



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VLIV SLOŽENÍ MODIFIKÁTORŮ TŘENÍ NA TRAKCI V  
KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE**

INFLUENCE OF FRICTION MODIFIERS COMPOSITION ON TRACTION IN WHEEL-RAIL CONTACT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Daniel Kvarda**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Radovan Galas**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Daniel Kvarda</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Radovan Galas</b>
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Modifikátory tření představují nový efektivní způsob řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice. Aplikací těchto kompozic lze docílit optimální úrovně adheze, snížení hluku a redukci opotřebení. Doposud publikované odborné články byly takřka výhradně zaměřeny na popis chování komerčně dostupných modifikátorů tření. V současné době tedy není popsán vliv jednotlivých složek modifikátorů tření na adhezi, opotřebení a schopnost utvářet třecí film.

Typ práce: výzkumná

Projekt: TAČR

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých složek modifikátorů tření na tření a opotřebení v kontaktu kola a kolejnice.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza složení modifikátorů tření,
- výběr a příprava jednotlivých kompozic,
- stanovení optimálního aplikovaného množství,
- experimenty a sběr dat,
- vyhodnocení, interpretace a publikace výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Editor R. Lewis, U. Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. Wear. 2010, 268(3-4), 543-551. DOI: 10.1016/j.wear.2009.09.015. ISSN 00431648.

CHIDDICK, K. Solid Lubricants & Friction Modifiers for heavy Loads and Rail Applications. Spojené státy americké. Patentový spis US006136757A. 24.10.2000.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

---

Modifikátory tření představují nový efektivní způsob řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice. Cílem této diplomové práce je experimentální studium vlivu složek vodního modifikátoru tření na adhezi. Měření adhezního chování různých složení modifikátoru tření je realizováno na laboratorním zařízení vytvářejícím bodový kontakt pomocí kuličky a disku. Úvodní část experimentů popisuje vliv samostatných složek na adhezi. Následně jsou testovány kombinace různých složení modifikátoru tření. Závěrem jsou vybrané kompozice využity pro testy opotřebení. Získané výsledky ukazují, že efektivita modifikátorů tření je výrazně ovlivněna vypařením základního média.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

---

kontakt kola a kolejnice, modifikátor tření, opotřebení, součinitel adheze, třecí vrstva

## **ABSTRACT**

---

Friction modifiers are a new effective way to control adhesion in wheel and rail contact. The aim of this diploma thesis is experimental study of the influence of the constituents of water based friction modifier on adhesion. Measurement of the adhesion behavior for different friction modifier compositions is carried out on a ball-on-disc laboratory device creating point contact. The introductory part of the experiments describes the effect of individual components on adhesion. Subsequently, combinations of different friction modifier compositions are tested. In conclusion, selected compositions are used for wear tests. The results obtained show that the performance of friction modifiers is greatly influenced by evaporation of base medium.

## **KEYWORDS**

---

wheel-rail contact, friction modifier, wear, adhesion coefficient, interfacial layer

---

---

---

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KVARDA, D. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas.

---

---

---



---

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Radovanu Galasovi za jeho odborné rady, připomínky a konzultace poskytnuté během zpracování této práce. Velké díky také patří mé rodině, která mě podporovala během celého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radovana Galase s využitím informací a zdrojů, které cituji v seznamu použité literatury.

V Brně dne .....

.....  
Daniel Kvarda

---

---

---

**OBSAH**

---

<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Přehled současného stavu poznání</b>	<b>14</b>
2.1 Kontakt kola a kolejnice	14
2.1.1 Adheze a přenos sil	14
2.1.2 Režimy mazání	17
2.1.3 Třecí vrstvy	18
2.2 Modifikátory tření v kolejové dopravě	19
2.2.1 Řízení adheze	23
2.2.2 Opotřebení a únavové poškození	26
2.2.3 Redukce hluku	29
2.3 Materiály modifikátorů tření na vodní bázi	30
2.3.1 Základní báze	31
2.3.2 Zahušťovadlo	31
2.3.3 Částice modifikátoru tření	31
2.3.4 Mazivo	32
2.3.5 Ostatní	32
<b>3 Analýza problému a cíl práce</b>	<b>33</b>
3.1 Zhodnocení poznatků plynoucích z rešerše	33
3.2 Cíl diplomové práce	33
<b>4 Materiál a metody</b>	<b>34</b>
4.1 Materiály pro modifikátor tření	34
4.2 Postup přípravy vzorku	35
4.3 Hodnocení adhezních vlastností kompozic	35
4.4 Hodnocení topografie povrchu	36
4.5 Hodnocení tloušťky mazacího filmu	37
4.6 Postup měření	37
<b>5 Výsledky</b>	<b>40</b>
5.1 Samostatné komponenty	40
5.2 Dvousložkové kompozice	41
5.2.1 Velké aplikované množství, mokrá film	41
5.2.2 Malé aplikované množství, mokrá film	45
5.3 Třísložkové kompozice	48
5.3.1 Velké aplikované množství, mokrá film	48
5.3.2 Malé aplikované množství, mokrá film	49
5.3.3 Malé aplikované množství, suchý film	52
5.4 Čtyřsložkové kompozice	55
5.4.1 Malé aplikované množství, mokrá film	55
5.4.2 Malé aplikované množství, suchý film	58
5.5 Testy opotřebení	60
<b>6 Diskuze</b>	<b>65</b>
6.1 Samostatné komponenty	65
6.2 Dvousložkové kompozice	66
6.3 Třísložkové kompozice	67
6.4 Čtyřsložkové kompozice	68
6.5 Testy opotřebení	69
6.6 Limitace experimentální studie	70

<b>7 Závěr</b>	<b>72</b>
<b>8 Seznam použitých zdrojů</b>	<b>73</b>
<b>9 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin</b>	<b>77</b>
<b>10 Seznam obrázků a grafů</b>	<b>78</b>
<b>11 Seznam tabulek</b>	<b>81</b>
<b>12 Seznam příloh</b>	<b>82</b>

## 1 ÚVOD

---

**1**

Železniční doprava je od počátku svého vzniku v 18. století jedním z nejeefektivnějších způsobů přepravy jak osob, tak i věcí a materiálu. Nízká energetická náročnost kolejové dopravy je způsobena zejména malými ztrátami v kontaktu kola s kolejnicí, jež se potkávají na velmi malé stykové oblasti. Běžné rychlosti do 19. století nepřekročily hranici 60 km/h se zátěží na jednu nápravu kolem 10 tun. V současné době dosahují vysokorychlostní vlaky rychlostí i 320 km/h (obvyklá rychlost francouzského TGV) a zátěž na nápravu se zvedla na 30 až 40 tun [1]. Železniční přeprava osob během posledních několika let výrazně vzrostla oproti ostatním způsobům dopravy. V České republice byl v letech 2012 až 2014 zaznamenán nárůst přepravy osob o 23% [2].

Tento vzestupný trend v železniční dopravě klade vysoké nároky, jak na úsporu energie, tak na bezpečnost a spolehlivost. Z pohledu cestujících je nejcitelnější zpoždění dopravních prostředků, které může být způsobeno zhoršenými podmínkami a nedostatečnou adhezí pro rozjezd a zastavení. Již delší dobu se pro zlepšení trakce využívá pískování, které se ukázalo jako velice efektivní způsob pro zvýšení adheze a také odstranění vrstvy listí z povrchu kolejnice, která v kombinaci s vodou způsobuje kriticky nízkou adhezi. Z dlouhodobého hlediska je ovšem tento způsob nevhodný. Dosažený součinitel adheze je vhodný z hlediska trakce, nicméně tvrdé částice písku ničí povrch kontaktních těles. V posledních letech se jako velice efektivní způsob řízení adheze ukázalo využití modifikátorů tření aplikovaných na temeno hlavy kolejnice, anglicky jsou tyto modifikátory nazvány top-of-rail friction modifiers (zkráceně ToR FM). Jsou to látky určené pro udržení adheze v optimálních mezích a zároveň snížení opotřebení kontaktních těles s pozitivním účinkem na snížení hluku [1].

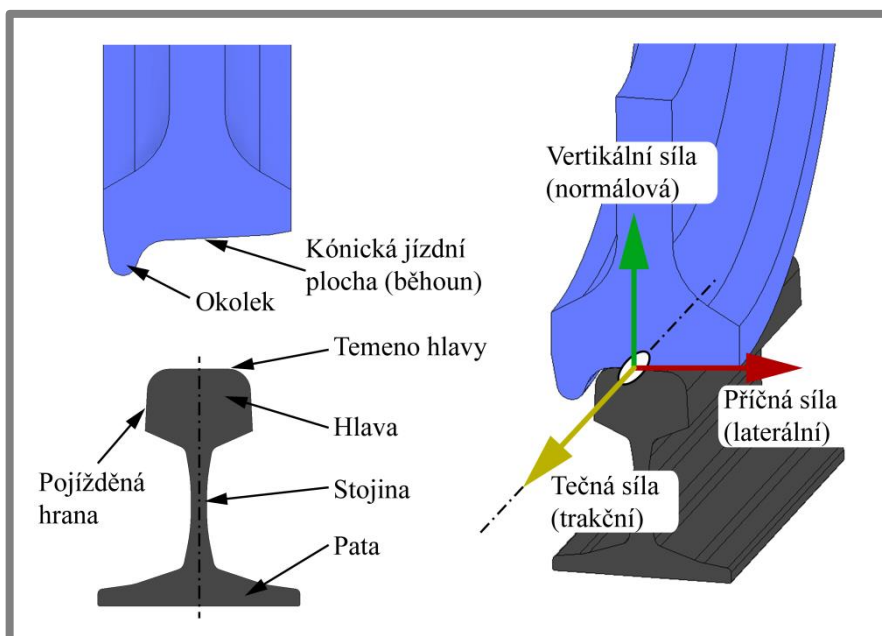
Tato diplomová práce se zabývá experimentální studií vlivu jednotlivých složek modifikátoru tření na adhezi, se zaměřením na vodní modifikátory tření. Cílem práce je objasnit, jak se jednotlivé složky modifikátoru v kontaktu chovají a jaký mají vliv na adhezní chování a utváření mazacího filmu.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešeršní část této práce se dělí na tři hlavní podkapitoly: **kontakt kola a kolejnice**, **modifikátory tření v kolejové dopravě** a **materiály modifikátorů tření na vodní bázi**. V první podkapitole jsou shrnuty základní poznatky z kontaktní mechaniky, dynamiky a tribologie popisující kontakt železničního kola s kolejnicí. Druhá podkapitola je zaměřena na tribologii třecích vrstev a modifikátorů tření. Poslední podkapitola popisuje jednotlivé složky modifikátorů na základně dostupných patentů.

### 2.1 Kontakt kola a kolejnice

Kontakt kola s kolejnicí je specifický a komplexní případ kontaktu dvou těles. Neexistuje mnoho analogií s podobnými součástmi, což zhoršuje využití zkušeností z jiných oblastí. Snad nejbližší jsou valivá kuličková ložiska a ozubená kola [1], ovšem tyto součásti jsou většinou uzavřené systémy s přesně definovanými a neměnnými podmínkami.



Obr. 2-1 Názvosloví kola (modrá) a kolejnice (šedá)

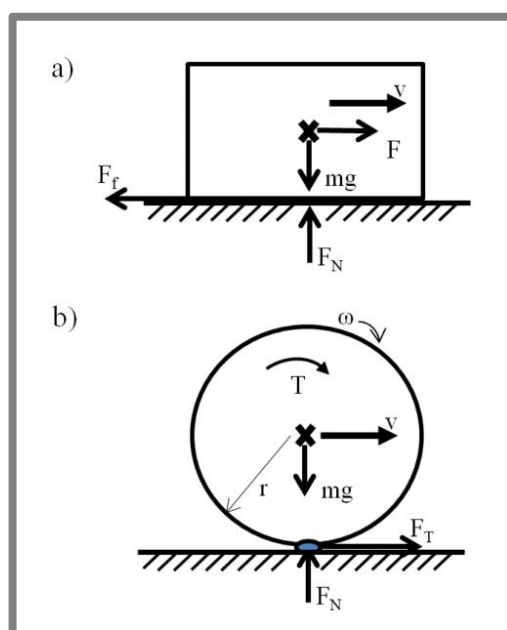
Kontakt kola a kolejnice je otevřený systém, který ovlivňují nejen vnější vlivy (teplota, vlhkost a kontaminace), ale také provozní podmínky. Kontakt, který přenáší trakční síly, je realizován mezi temenem hlavy kolejnice a kónickou jízdní plochou (obr. 2-1). Velikost kontaktní plochy se pohybuje okolo  $1 \text{ cm}^2$ , avšak v průběhu jízdy se tato oblast může měnit [1].

#### 2.1.1 Adheze a přenos sil

V tribologii je *adheze* definována jako síla potřebná pro oddělení dvou povrchů v kontaktu [2]. V oblasti kolejové dopravy se tento termín (adheze, příp. adhezni síla) začal používat pro označení tečné (trakční) síly vyvozené v kontaktu. Podobný termín je *třecí síla*, která je definována jako odpor proti pohybu jednoho tělesa pohybujícího se po druhém. Mechanismus přenosu sil třením lze rozdělit do tří

základních kategorií: (1) tření za pomoci deformace nerovností, (2) tření za pomoci adheze (oddělení dvou povrchů) a (3) tření za pomoci abraze [3].

Rozdíl mezi adhezí a třením je ilustrován na obr. 2-2. V případě a) se jedná o těleso ve tvaru kvádru, které se smýká po podložce rychlostí  $v$ . Na těleso působí kolmá (normálová) síla od podložky  $F_N$ , která je způsobná hmotností tělesa  $m$ , a tažná síla  $F$  ve směru rovnoběžném s podložkou. Třecí síla, která brání pohybu, je označena jako  $F_f$  a směřuje proti pohybu tělesa. Součinitel tření je poté definován jako poměr mezi třecí silou  $F_f$  a normálovou silou  $F_N$ . V případě b) se válcové těleso (kolo) odvaluje po podložce. Na kolo opět působí normálová síla  $F_N$  a pohybuje se rychlostí  $v$ . Úhlovou rychlost  $\omega$  udržuje moment  $T$ , který způsobuje reakční tečnou (trakční) sílu  $F_T$ . Poměr mezi trakční silou  $F_T$  a normálovou silou  $F_N$  se nazývá součinitel adheze.



Obr. 2-2 Schéma a) smýkání tělesa po podložce, b) valení válce po podložce [4]

Při táhnutí kvádru po podložce vždy dochází ke smýkání, protože podložka je stacionární a kvádr i jeho plocha v kontaktu se pohybují rychlostí  $v$ . V případě kola a kolejnice ovšem povrchy v kontaktu mohou dosahovat stejných nebo různých rychlostí. Pokud je obvodová rychlost  $\omega \cdot r$  rovna rychlosti pohybu kola  $v$ , jedná se o *čisté valení* a nejsou přenášeny tečné síly [5]. Aby došlo k přenosu trakčních sil mezi kolem a kolejnicí, musí být obvodová rychlost jiná než rychlost pohybu kola. Při zrychlování, nebo překonávání ztrát pro udržení konstantní rychlosti, je obvodová rychlost větší než rychlost poháněného kola ( $\omega \cdot r > v$ ). Při brzdění je naopak obvodová rychlost menší než rychlost pohybu kola ( $\omega \cdot r < v$ ). Termín *trakční síla* je většinou používán pro označení síly přenášené při rozjezdu, zatímco *adhezní síla* pro sílu přenášenou při brzdění vozidla [1].

Při provozu kolejového vozidla dochází k prokluzu mezi kolem a kolejnicí, přičemž velikost prokluzu je závislá na řadě provozních a okolních podmínek. Pro kvantifikaci rozdílných rychlostí povrchů při prokluzu byl zaveden parametr

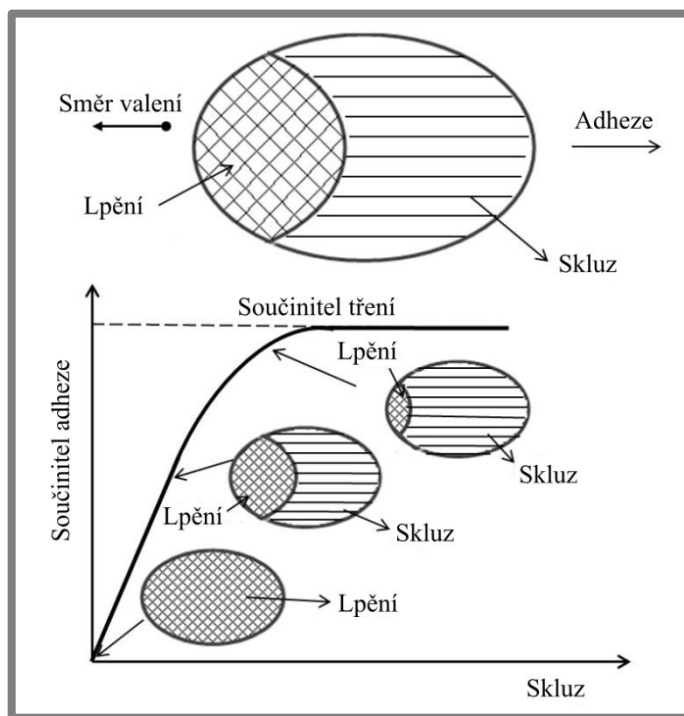
*skluz* (často je používána zkratka SRR z anglického výrazu slide-to-roll ratio). Skluz porovnává rozdíl rychlostí povrchů a rychlost pohybu kola (rovnice (2-1)) [4].

$$\xi = \frac{\omega \cdot r - v}{\frac{1}{2}(\omega \cdot r + v)} \quad (2-1)$$

kde:

$\xi$	-	je skluz
$\omega$	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	- úhlová rychlost
$r$	m	- poloměr kola
$v$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	- rychlost kola

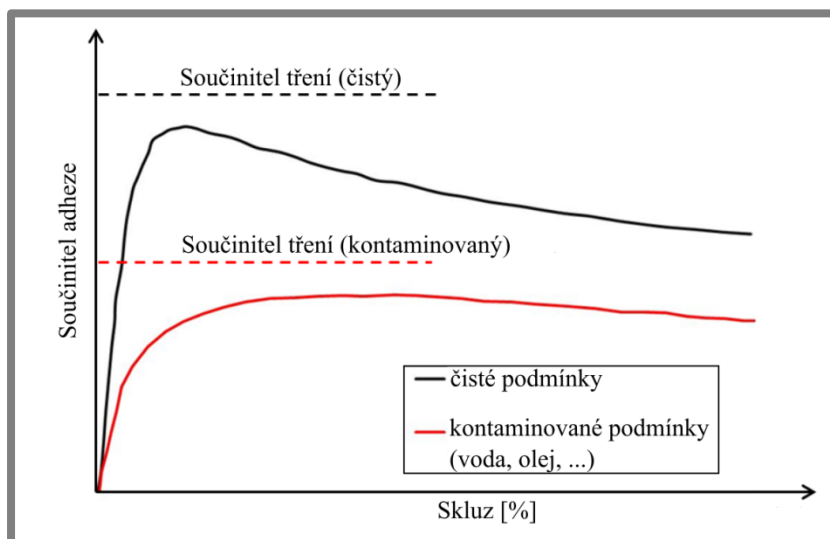
Trakční křivka popisuje vztah mezi součinitelem adheze a skluzem (obr. 2-3). Při nulovém skluzu je kontakt tvořen oblastí *lpění*, kde nejsou přenášeny tečné síly, jedná se tedy o čisté valení. S postupně rostoucím skluzem vzniká od výstupního okraje oblast skluzu. Se zvyšujícím se skluzem roste adheze a oblast skluzu se rozšiřuje směrem k vstupnímu okraji kontaktní oblasti. Zpočátku je průběh nárůstu součinitele adheze lineární. Poté sklon křivky klesá (menší přírůstek součinitele adheze) s rostoucím skluzem a nastává *bod saturace*. Po dosažení bodu saturace jsou síly přenášeny celou kontaktní oblastí. V ideálním případě (obr. 2-3) je maximální hodnota součinitele adheze za bodem saturace limitována součinitelem tření a adheze se při dále zvyšujícím skluzu nemění (tzv. *neutrální charakteristika tření*). Pokud součinitel adheze za bodem saturace narůstá tak se jedná o *pozitivní třecí charakteristiku*. Při klesajícím trendu součinitele adheze jde o *negativní třecí charakteristiku*.



Obr. 2-3 Trakční křivka - upraveno [4]



V případě kontaktu kola a kolejnice je bodu saturace dosaženo okolo 1–2 % skluzu [1, 4]. Část tření je využita v laterálním směru a spinu. Součinitel adheze je tedy vždy nižší než součinitel tření (obr. 2-4). V případě čistých kontaktních podmínek má třecí charakteristika negativní sklon [4].



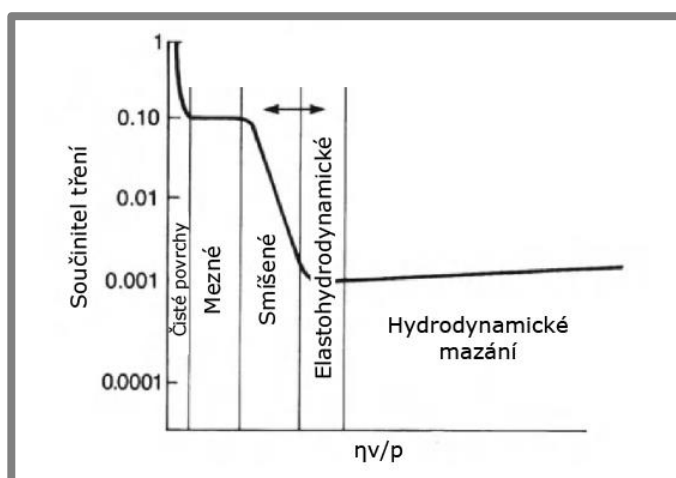
Obr. 2-4 Trakční křivka pro kontakt kola a kolejnice - upraveno [4]

S negativní třecí charakteristikou je spojen oscilační jev zvaný *stick-slip*. Tento jev nastává, když se součinitel adheze u jednoho kola blíží maximálnímu limitu. Toto kolo poté proklouzne a pohání druhé kolo na nápravě. Toto opakované prokluzování vede na oscilace, jejichž frekvence je spjatá s druhou torzní rezonancí hnaného soukolí. Tento prokluz nastává zejména na vnějším kole při průjezdu vozidla traťovým obloukem [6].

### 2.1.2 Režimy mazání

2.1.2

Na základě drsnosti povrchu a tloušťky mazacího filmu (vzdálenosti třecích povrchů), se režimy mazání rozdělují na čtyři hlavní kategorie [5]. Hydrodynamické (HD) mazání (obr. 2-5) nastává, když jsou povrchy odděleny mazacím filmem



Obr. 2-5 Režimy mazání - upraveno [5]

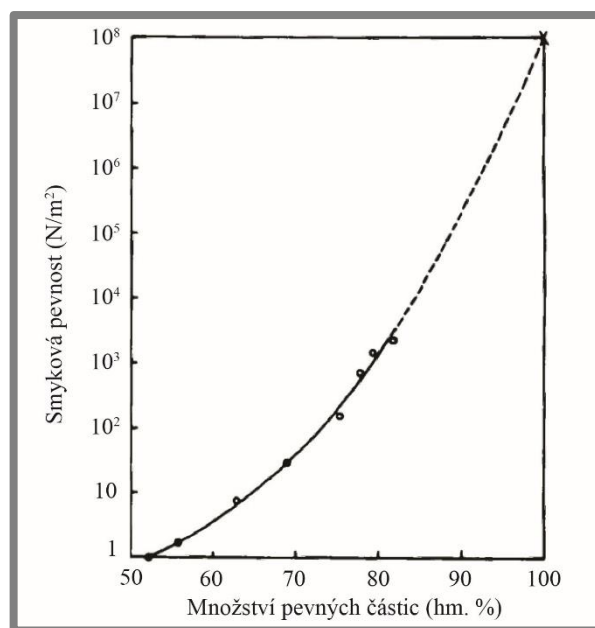
několikanásobně větším než nerovnosti povrchů. Elastohydrodynamické (EHD) mazání je podskupina hydrodynamického mazání, ve kterém hraje výraznou roli deformace povrchu. Poměr mazacího filmu k drsnosti povrchu bývá větší než 5. Přechod mezi EHD/HD a mezným mazáním se nazývá smíšené mazání. V tomto režimu je tloušťka mazacího filmu (1–5) $\times$  větší než drsnost povrchu. Může zde nastat částečný kontakt mezi nerovnostmi, ovšem většina povrchu je nesena HD filmem. U mezného mazání je velikost nerovností větší než tloušťka mazacího filmu. Pro tento režim je zásadní kontakt nerovností s mazacím filmem o velmi malé tloušťce. V případě kontaktu kola s kolejnicí je dominantní mezný režim mazání [1].

### 2.1.3 Třecí vrstvy

Kontakt kola a kolejnice je otevřený tribologický systém, v němž důležitou roli hrají látky, které jsou mezi povrchy kola a kolejnice. Tato „*třetí tělesa*“ mohou pocházet z okolí (listí a dešťová voda) nebo ze samotného vozidla (mazivo okolku a písek z pískovacího zařízení). Dále mohou být třetí tělesa vytvořena oxidací povrchu, částicemi opotřebení, apod.

Mezi první autory zabývající se třecími vrstvami mezi kolem a kolejnicí patří Beagley. V první publikaci [7] Beagley a kol. popisují vliv různých olejů a různého aplikovaného množství na součinitel tření. Oleje byly testovány na jednoduchém tribometru, který je složen z ocelové podložky a odvalujícím se disku s průměrem 152 mm a rádiusem 72 mm. Chemické složení testovaných olejů mělo nepatrný vliv oproti aplikovanému množství. Vzdušná vlhkost také hrála důležitou roli na třecí vlastnosti olejů. Při nižší vzdušné vlhkosti součinitel tření dosahoval vyšších hodnot.

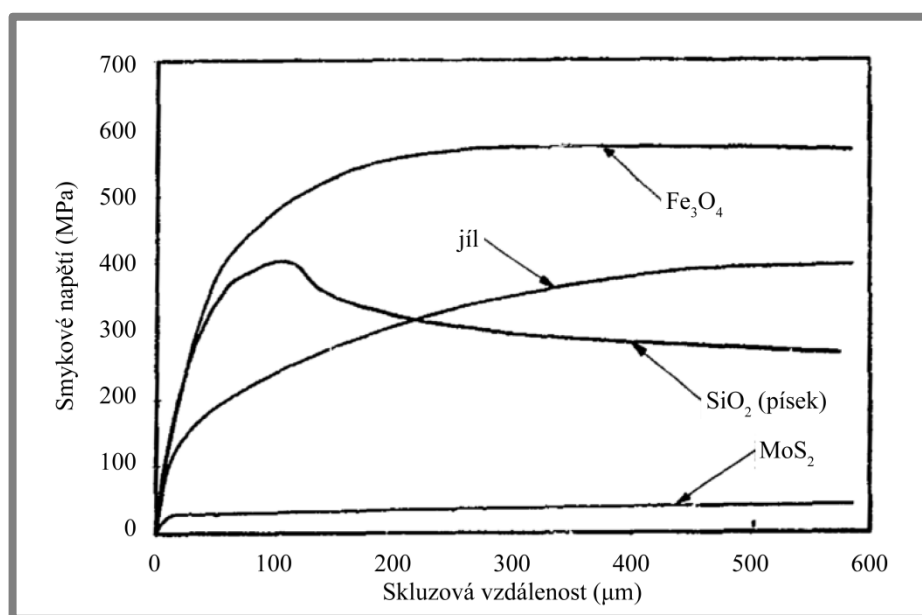
Navazující Beagleyho publikace [8] se zabývala přítomností pevných kontaminantů v kombinaci s vodou na adhezní vlastnosti. Směsi byly testovány na zařízení simulujícím reálné zatížení a kontaktní oblast. Hlavní testovanou látkou byly částice  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  smíchané s vodou v různých koncentracích (obr. 2-6). Již malé množství vody smíchané s částicemi opotřebení (10–20 % vody) dokázalo snížit



**Obr. 2-6** Vliv množství pevných částic ve vodě na smykovou pevnost – upraveno [8]

smykovou pevnost vrstvy o 5 řádů. Pevnost této vrstvy byla výrazně nižší než vrstva listí, která umí snížit součinitel adheze až na hodnotu 0,05. Již malé množství vody s částicemi tedy dokáže vytvořit vrstvu, která dosahuje velmi nízkých hodnot součinitele adheze.

Třecí povrchy mohou být částečně nebo úplně odděleny jak vrstvou oxidů, tak materiálem z okolí. Studii třecích vrstev kontaminantů, běžně se vyskytujících na kolejnici, publikoval Hou a kol. [9]. Pro porovnání byly v této práci testovány čtyři materiály: oxidované částice opotřebení, písek, jíl a disulfid molybdenu. Látky byly testovány na reometru, který zatěžuje pin s rovnou čelní plochou vůči otáčející se podložce. Měřena byla závislost smykového napětí vrstvy na posunu pinu (tedy skluzové vzdálenosti). Rostoucí skluzová vzdálenost je způsobena relativním pohybem kontaktních povrchů (skluzem), ačkoli skluz nelze v tomto případě vyjádřit procentuálně. Z obr. 2-7 je patrné, že každá z testovaných látek vykazuje odlišné třecí vlastnosti. Tyto odlišnosti nezahrnují pouze velikost smykového napětí, ale také závislost smykového napětí na skluzové vzdálenosti. Různé trendy těchto křivek se nazývají třecí charakteristiky (blíže vysvětleny v kapitole 2.1.1). Oxidované částice železa a mazivo vykazují neutrální trend třecí charakteristiky. Velikost částic obou těchto materiálů se pohybovala pod  $1\ \mu\text{m}$ . Naopak tvrdé a velké částice písku dosahují negativního trendu. Vrstva jílu (s velikostí částic podobnou písku) v celém rozsahu měření dosahovala pozitivní třecí charakteristiky. Tyto třecí charakteristiky byly dále popsány elasto-plastickým reologickým modelem.

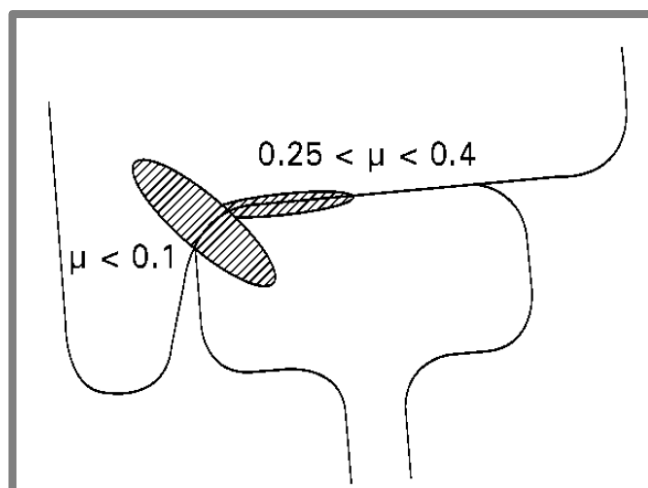


Obr. 2-7 Smykové napětí látek za různého skluzu – upraveno [9]

## 2.2 Modifikátory tření v kolejové dopravě

Modifikátor tření lze popsat jako uměle vytvořený produkt, který má za úkol udržet součinitel tření v určitých mezích. Vyrábí se od tekuté až po tuhou konzistenci, která se aplikuje na temeno hlavy kolejnice nebo přímo do kontaktu. Aplikace

je prováděna stacionárními jednotkami na trati nebo zařízením na kolejovém vozidle. V kontaktu kola a kolejnice vznikají dvě oblasti (obr. 2-2), ve kterých je nutné zajistit různý součinitel adheze. První oblastí je kontakt okolku s pojížděnou hranou kolejnice, kde je zapotřebí dosáhnout co nejnižšího součinitele adheze. Pro mazání této oblasti se využívají systémy pro mazání okolku, které jsou běžně umístěny na kolejových vozidlech. Druhou oblastí je kontakt kónické jízdní plochy s temenem hlavy kolejnice, kde jsou přenášeny trakční síly. Zde je potřeba dosáhnout dostatečného součinitele adheze, aby byl kontakt schopen přenést trakční síly, zejména pro rozjezd a brždění vozidla. V případě kontaminace kontaktu (např. listí, voda, olej, atd.) se kladou vysoké požadavky na rychlé obnovení adheze a odstranění vzniklé vrstvy mezi kolem a kolejnicí. Pro tyto účely se používají pískovací zařízení, které umožňují prudký nárůst součinitele adheze a odstranění vrstvy kontaminantů. Díky příliš vysokému součiniteli adheze způsobuje pískování nárůst opotřebení a poškození kontaktních povrchů, které je ovšem v porovnání s riziky velmi nízké adheze zanedbatelné. Jako alternativa pro zajištění vhodného součinitele adheze jak za suchých, tak i kontaminovaných podmínek se v poslední době začaly používat modifikátory tření.

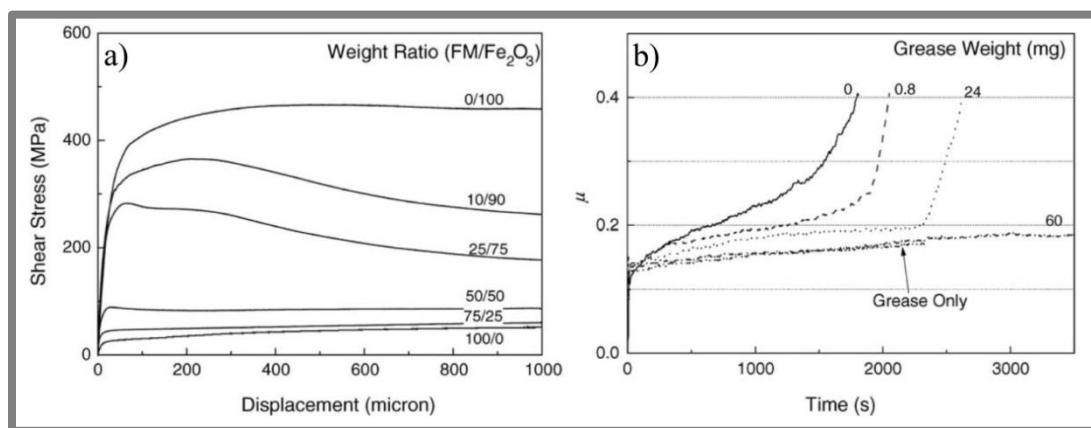


Obr. 2-8 Dvě kontaktní oblasti kola a kolejnice [1]

Na základě předchozího odstavce lze určit tři základní kategorie produktů používaných v oblasti kolejové dopravy. První skupinou jsou látky pro snížení součinitele adheze na co nejnižší úroveň, které se často označují jako LCF (low coefficient of friction). Jedná se o maziva používaná pro mazání okolku, která dosahují součinitele adheze pod 0,1. Následují látky zajišťující optimální úroveň adheze pro přenos sil mezi kolem a kolejnicí s požadavkem na pozitivní třecí charakteristiku. Tyto látky se označují jako HPF (high positive friction). Jedná se o hlavní skupinu modifikátorů tření. Součinitel adheze pro tuto skupinu modifikátorů tření je mnoha publikacemi udáván v rozmezí 0,15–0,4 v závislosti na skluzových podmínkách (toto rozmezí je v této práci definováno jako optimální úroveň adheze). Modifikátory tření dosahující spodních hodnot součinitele adheze (0,15–0,25) jsou využívány u tramvajových linek v obydlených oblastech, protože dokáží redukovat hluk způsobený stick-slip oscilacemi. Horní hranice součinitele adheze (0,25–0,4) je naopak mířena na přepravu těžkých nákladů [10]. Poslední skupinou jsou látky pro zvýšení součinitele adheze na co nejvyšší

hodnotu, které se označují VHPF (very high and positive friction). Tyto látky se používají pro zvýšení adheze při rozjezdu a brzdění.

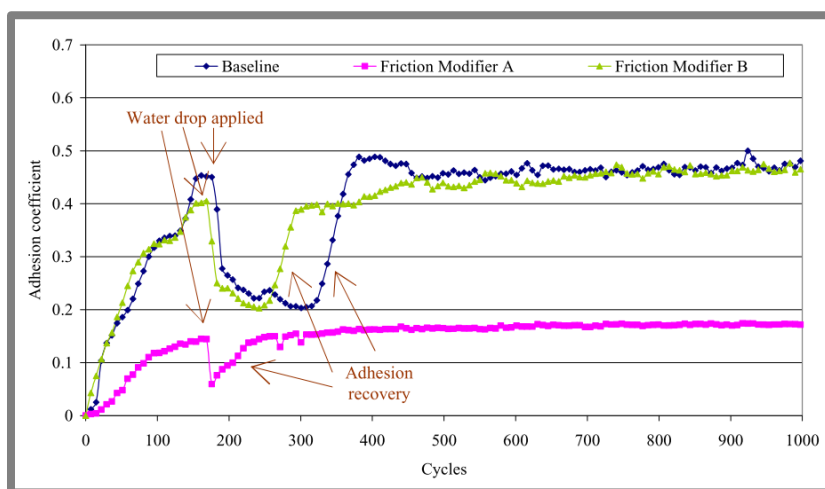
Velká část publikací zabývajících se modifikátory tření jsou zaměřené na hodnocení výkonnosti modifikátoru (zajištění optimální úrovně adheze, snížení vlnkovitého opotřebení kolejnice, redukce hluku a zabránění vzniku únavových trhlin). Pouze malý počet publikací je zaměřen na popsání interakce modifikátoru tření s třetí vrstvou (zejména listím a částicemi opotřebení). Jedna z těchto studií [11] se zabývala vlivem smísení modifikátoru tření s částicemi opotřebení a mazivem okolku. Testovaný modifikátor tření byl od firmy Kelsan. Jako částice opotřebení byl použit hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) s průměrnou velikostí částic  $5\text{ }\mu\text{m}$  a mazivo Shell Cardura<sup>®</sup> WS. Kompozice kontaminovaná částicemi opotřebení byla testována na pin-on-disc reometru. V případě maziva byly testy provedeny na disc-on-disc zařízení. Na obr. 2-9a lze pozorovat chování modifikátoru tření v kombinaci s částicemi opotřebení za různých skluzových podmínek. Samotné částice měly neutrální třecí charakteristiku, avšak s 10 % modifikátoru tření se charakteristika změnila na negativní. Zároveň došlo k výraznému poklesu smykového napětí vrstvy. Neutrální trend byl znovu dosažen až při 50 % modifikátoru tření. Z vyhodnoceného součinitele tření bylo patrné, že již při 20 % modifikátoru tření došlo k snížení adheze pod hranici 0,4 (v rozmezí měřených kontaktních tlaků 200–900 MPa). Přidáváním různého množství maziva do 2–3 mg modifikátoru tření docházelo k postupnému snižování součinitele adheze a prodlužování doby působení třecí vrstvy (obr. 2-9b). Při 60 mg maziva se již vrstva chovala tak, jako kdyby neobsahovala modifikátor tření. V této studii autoři zároveň potvrdili chování kontaminovaného modifikátoru tření na základě equal wear modelu [12]. Tento závěr naznačuje, že velikost součinitele tření je primárně řízena odolností proti opotřebení (otěruvzdorností) látek v kompozici.



Obr. 2-9 a) trakční křivky směsi modifikátoru a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , b) modifikátor kontaminovaný mazivem [11]

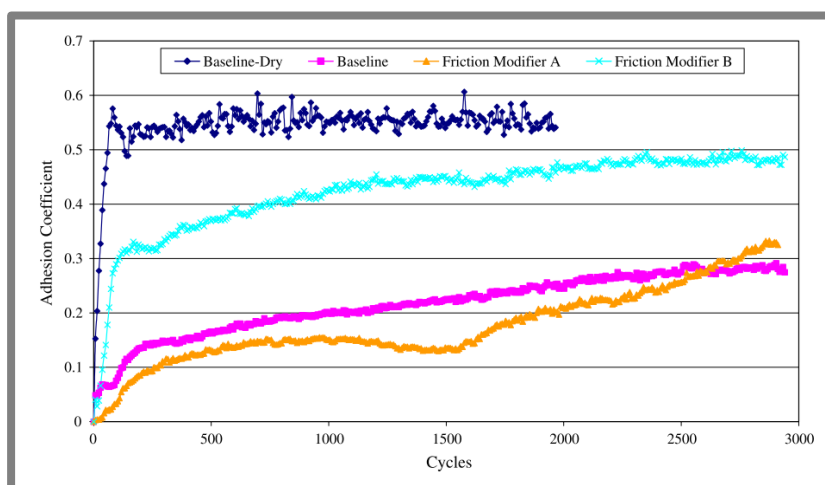
Efektivitu modifikátoru tření při kontaminaci listím a vodou studovali autoři Arias-Cuevas a kol. [13, 14]. Testovány byly dva modifikátory tření na vodní bázi. Kompozice označovaná jako FMB obsahuje kovové částice a částice písku o velikostech 300 až 2000  $\mu\text{m}$ . FMA modifikátor tření (velikost částic 50 až 400  $\mu\text{m}$ ) byl testován proto, že byl považován za potencionální náhradu FMB, který již byl používán v Nizozemí a Velké Británii. V obou pracích byly testy provedeny na dvoudiskovém (twin-disc) zařízení. Disky byly vyrobeny z materiálů odpovídajících železničnímu kolu a kolejnici. Na obr. 2-10 jsou porovnány oba modifikátory

tření a suchý kontakt při aplikaci jedné kapky vody (1 % skluz a kontaktní tlak 1,2 GPa) [13]. Z počátečního nárůstu adheze je patrné, že FMA dosahuje nižších hodnot adheze (přibližně 0,15), zatímco FMB se chová podobně jako suchý kontakt (baseline). Při aplikaci vody dojde k propadu adheze, přičemž pro FMB je propad mnohem větší a déle trvající. Nejnižší součinitel adheze dosahuje hodnot 0,2. V případě FMA je propad o něco menší, ovšem dosahuje mnohem nižších hodnot adheze (cca 0,06). Délka propadu adheze je u FMA kratší než u FMB. Za suchých podmínek byl propad adheze velice podobný FMB ovšem délka trvání propadu byla značně delší. Doba mezi počátečním poklesem a obnovením součinitele adheze je jeden z nejdůležitějších faktorů. Tato doba naznačuje počet průjezdů kontaminovanou vrstvou, po kterých zmizí veškerý vliv vody.



Obr. 2-10 Porovnání modifikátorů tření při aplikaci jedné kapky vody [13]

V druhé zmíněné publikaci [14] byly oba modifikátory tření otestovány při kontaminaci listím. Listy byly ručně přidávány do dávkovacího zařízení, které je posouvalo do kontaktu mezi disky. Na obr. 2-11 lze vidět test při 1 % skluzu a kontaktním tlaku 1,2 GPa. Modrá křivka ukazuje referenční hodnotu suchého kontaktu. Fialová křivka reprezentuje hodnotu součinitele adheze samostatných listů bez přítomnosti modifikátoru tření. FMB opět dosahuje vyšších hodnot součinitele



Obr. 2-11 Porovnání modifikátorů tření při kontaminaci listím [14]



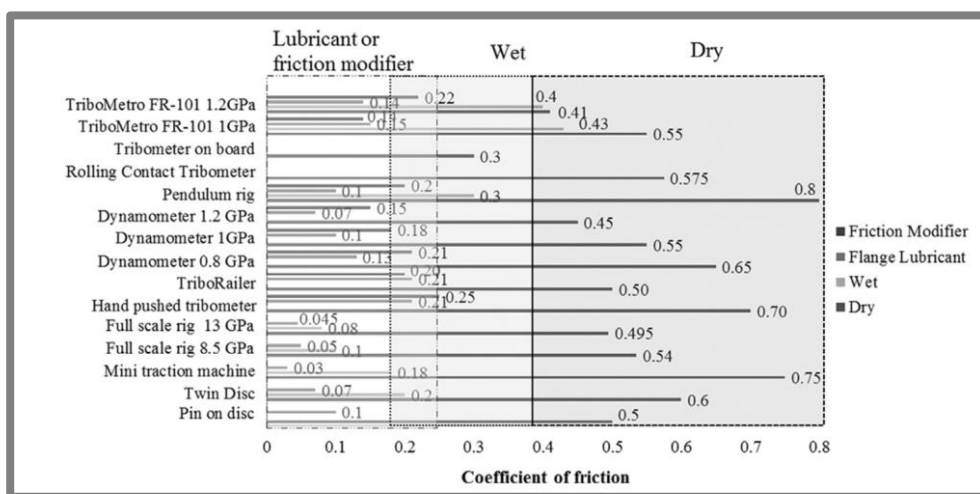
adheze než FMA a je účinnější při odstraňování vrstvy listí. FMA v kombinaci s listím dosahuje nižších hodnot adheze než samostatné listí.

Velké a tvrdé částice FMB zajišťovaly výrazně lepší obnovu adheze jak za přítomnosti vody tak i listí. Menší částice FMA docílily nižší hodnoty adheze a zároveň se jevily jako neúčinné při odstranění vrstvy listí. Vrstva listí se běžně může pohybovat od 10 do 100  $\mu\text{m}$ . Pokud je velikost částic použitého modifikátoru menší než utvořená vrstva, mohou být částice zcela neefektivní při jejím odstranění.

### 2.2.1 Řízení adheze

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly 2.2, udržení adheze v optimálních hodnotách je jedním z klíčových aspektů v oblasti modifikace tření. Různé experimentální zařízení ovšem mohou dosahovat odlišných součinitelů adheze. Srovnání různých metod a měření součinitele adheze na reálné kolejnici provedli Areiza a kol. [15]. Na obr. 2-12 lze pozorovat porovnání různých metod měření součinitelů adheze (tření) z několika publikací. Pro porovnání byly uvedeny experimenty s modifikátorem tření, mazivem okolku, měření za suchých a mokrých podmínek (odkazy na jednotlivé práce jsou uvedeny v publikaci [15]). Mezi důvody pro široké rozpětí naměřených hodnot patří odlišné měřicí metody a použítá zařízení, závislost součinitele tření na kontaktním tlaku a povrchu (rozdílné drsnosti, oxidace) a také různé velikosti a tvary kontaktních oblastí.

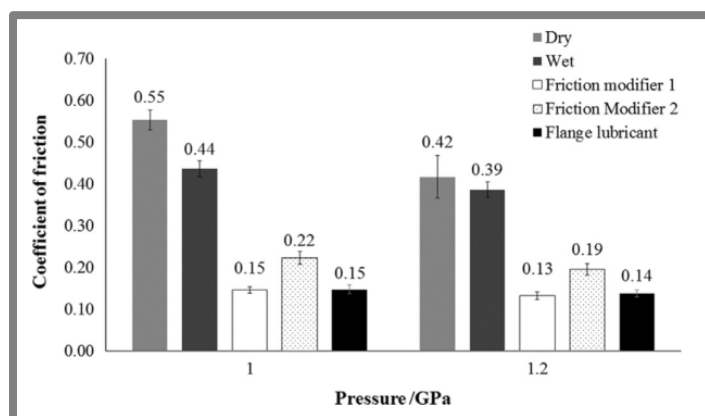
2.2.1



Obr. 2-12 Porovnání součinitelů tření u různých zařízení [15]

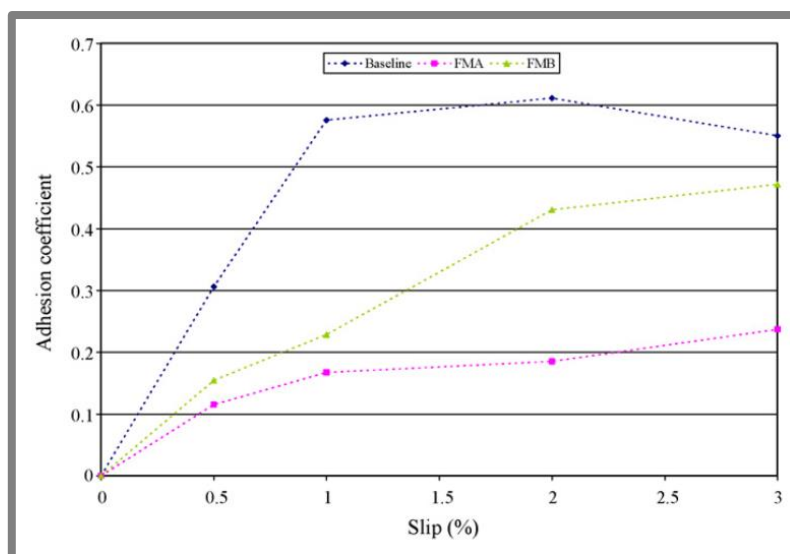
V práci [15] bylo zároveň provedeno měření součinitele adheze na kolejích pomocí ručně tlačného tribometru Tribometro FR 101. Byl použit komerční modifikátor tření (friction modifier 1) a komerční mazivo okolku. Druhý modifikátor tření (friction modifier 2) byl vyrobený autory. Složení tohoto modifikátoru tření v práci není uvedeno. Všechny znázorněné hodnoty (obr. 2-13) značí průměry z celkem dvaceti měření za dvou kontaktních tlaků. Oba komerční produkty (mazivo a modifikátor tření) dosáhly takřka stejných hodnot součinitele adheze. Hodnoty těsně přesáhly hranici součinitele adheze 0,15 při vyšším tlaku. Nekomerční modifikátor tření dosáhl o něco vyšších hodnot, které se pohybovaly nad 0,15. Se zvýšením tlaku došlo ve všech případech k snížení součinitele tření. Z výsledků

je také patrné, že modifikátor tření a mazivo jsou méně citlivé na změnu kontaktního tlaku, než kontakt za suchých a mokrých podmínek.



Obr. 2-13 Součinitel adheze naměřený ručním tribometrem [15]

Autoři Arias-Cuevas a kol. navazují na své předešlé práce [13, 14] experimentální studii [16], ve které opět porovnávají modifikátory tření, s tím rozdílem, že neobsahují další přidané kontaminanty. Bylo zde použito stejné zařízení typu twin-disc. Trakční křivky naměřené s použitými modifikátory tření za suchých podmínek jsou zobrazeny na obr. 2-14. Všechny vynesené body v grafu jsou průměrné hodnoty z časových testů o délce 2000 cyklů. Za suchých podmínek (baseline) bylo bodu saturace dosaženo kolem 2 % skluzu, poté došlo k poklesu adheze naznačující negativní trend třecí charakteristiky. Oba testované modifikátory (FMA, FMB) dokázaly odstranit negativní trend a snížit součinitel adheze. Stejně jako v předchozích pracích [13, 14] byl součinitel adheze v rozmezí testovaných skluzů vyšší u modifikátoru tření FMB. Při dosažení skluzu 3 % se součinitel adheze pro FMB blížil hodnotě adheze za suchých podmínek. Naopak u modifikátoru tření FMA po překročení 1 % skluzu nedocházelo k výraznému nárůstu součinitele adheze. Časové testy také ukázaly, že FMB po počátečním záběhu (cca 50–100 cyklů) výrazně nemění součinitel adheze. Naopak v případě FMA za podmínek skluzu vyššího než 1 % vždy docházelo k stoupajícímu trendu průběhu

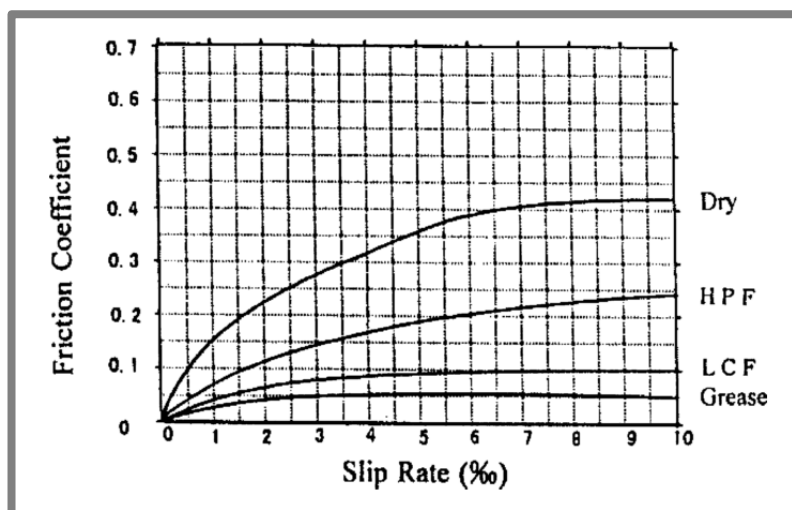


Obr. 2-14 Trakční křivky testovaných modifikátorů tření [16]



adheze. Strmost tohoto nárůstu se zvětšovala s rostoucím skluzem (dosažení hodnoty součinitele adheze za suchých podmínek: 1700 cyklů pro 2% skluz a 1000 cyklů pro 3% skluz). Velikost částic měla opět dominantní vliv jako za podmínek kontaminace vodou a listím.

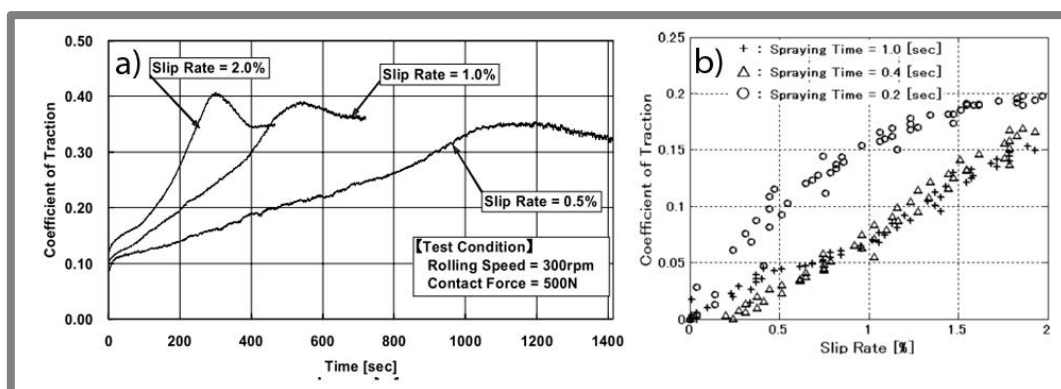
Podobné dvoudiskové zařízení jako v předchozích publikacích bylo využito pro porovnání dvou typů modifikátorů tření a běžného maziva okolku Tomeokou a kol. [17]. Průměry obou disků byly 172 mm (jeden disk válcový, druhý se 100 mm rádiusem) a zatěžovací síla činila 2450 N. Oba použité modifikátory tření na vodní bázi (LCF a HPF) byly vyvinuty společností Kelsan. Před aplikací modifikátoru tření byly disky opracovány smirkovým papírem a poté zaběhnuty s malým skluzem za suchých podmínek dokud nebylo dosaženo stabilní hodnoty součinitele adheze. Tím byly zajištěny stejné podmínky před každou aplikací modifikátoru tření. Aplikace modifikátoru byla provedena nástřikem na povrch jednoho z disků. Výsledné trakční křivky lze vidět na obr. 2-15. Běžné mazivo (grease) dosáhlo nejnižších hodnot součinitele adheze cca 0,05. LCF modifikátor tření dosáhl součinitele adheze 0,1 při skluzu 6 % a dále vykazoval neutrální trend třecí charakteristiky. Součinitel adheze pro HPF modifikátor tření rostl v celém rozsahu měřených skluzů. V případě suchých podmínek bylo bodu saturace dosaženo při 8 % skluzu a do 10 % skluzu nedošlo k výraznému nárůstu.



Obr. 2-15 Trakční křivky testovaných modifikátorů tření [17]

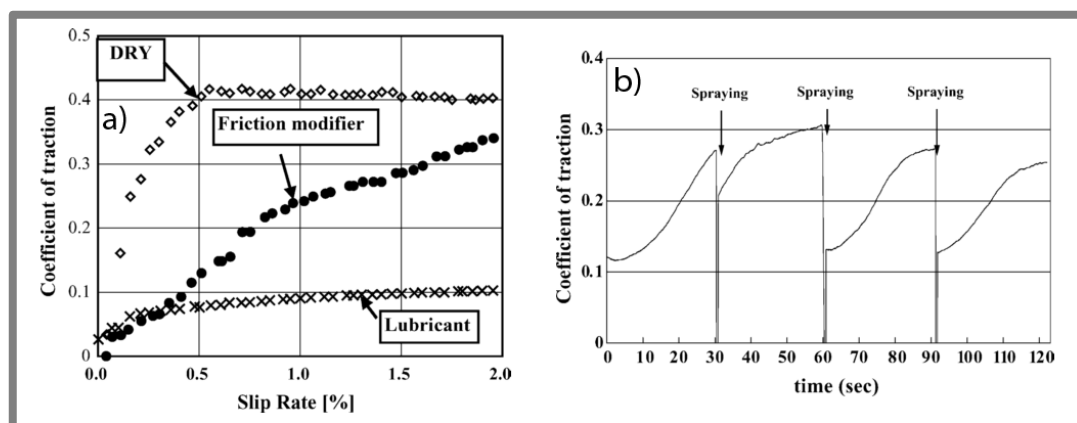
Stejné dvoudiskové zařízení jako v práci Tomeoki a kol. [17] bylo použito v publikaci Matsumota kol. [18]. Cílem bylo popsat chování modifikátoru tření při různých aplikovaných množstvích a za různých skluzových podmínek. Byl použit modifikátor tření KELTRACK HPF. Testy byly prováděny při rychlosti otáčení disků 300 ot/min a kontaktní síle 500 N. Na obr. 2-16a lze vidět, že dvojnásobně větší skluz zkrátí efektivní dobu působení modifikátoru na polovinu. Vyšší hodnoty skluzu tedy spotřebovávají větší množství modifikátoru tření. Na obr. 2-16b je graf různých aplikovaných množství (aplikované množství je zde odvozeno z doby nástřiku modifikátoru). Zde se skluz průběžně zvyšoval po celou dobu testu (40 s). Při aplikačních dobách 1 s a 0,4 s nebyl znatelný rozdíl v trakční křivce. Z toho vyplývá, že po celou dobu testu byly adhezní síly přenášeny vrstvou modifikátoru tření. Při aplikační době 0,2 s již došlo k znatelnému nárůstu součinitele adheze, který je spojen s přenášením adhezních sil z části kontaktem povrchů a z části

modifikátorem tření. Z práce tedy vyplívá, že množství aplikovaného modifikátoru může výrazně ovlivnit adhezní chování.



Obr. 2-16 Vliv a) skluzu na vrstvu modifikátoru tření, b) aplikovaného množství – upraveno [18]

Suda a kol. ve své práci [19] testovali modifikátor tření na vodní bázi KELTRACK. V rámci studie byl modifikátor tření otestován na dvoudiskovém zařízení. Na obr. 2-17a jsou vidět rozdílné trakční křivky pro suchý kontakt, modifikátor tření a lubrikant. Bodu saturace pro suchý kontakt je dosaženo při skluzu 0,5 %. Se zvyšujícím se skluzem dochází k mírnému poklesu součinitele adheze. V případě modifikátoru tření součinitel adheze pro testované skluzy roste. Testovaný lubrikant dosáhl maximální hodnoty adheze 0,1. Obr 2-17b ukazuje vliv opětovné aplikace modifikátoru tření. Aplikace byla provedena vždy po 30 s při skluzu 2 %. Z grafu je patrné, že při aplikaci dojde k propadu součinitele adheze do velmi nízkých hodnot.



Obr. 2-17 a) trakční křivky, b) opětovná aplikace modifikátoru tření – upraveno [19]

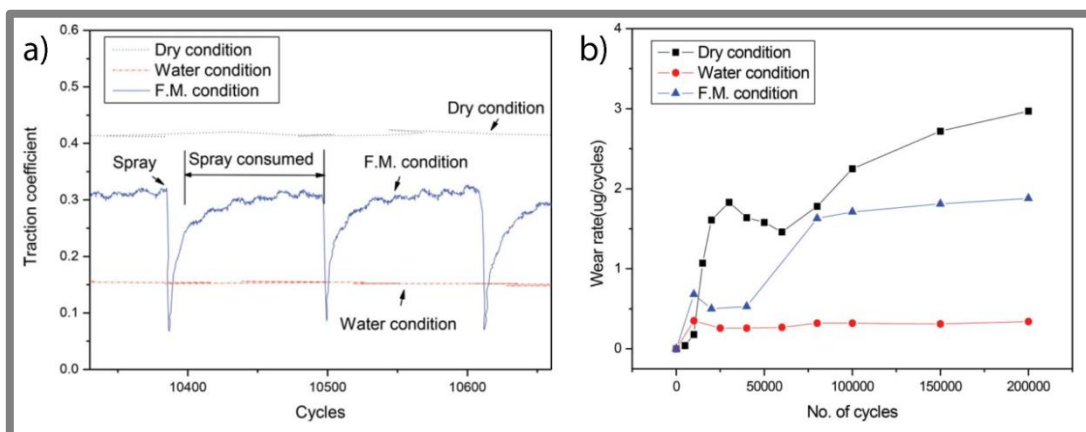
Modifikátory tření jsou v této práci zároveň otestovány na trati pomocí testovacího vozidla. Při použití modifikátoru tření došlo k redukci laterálních sil při průjezdu zatáčkou až o 73 % na vnitřním kole a také redukci hluku.

## 2.2.2 Opatření a únavové poškození

Při opotřebení nebo poškození kola nebo kolejnice musí z důvodů bezpečnosti dojít k jejich výměně nebo přebroušení. Hlavními původci opotřebení jsou vysoký

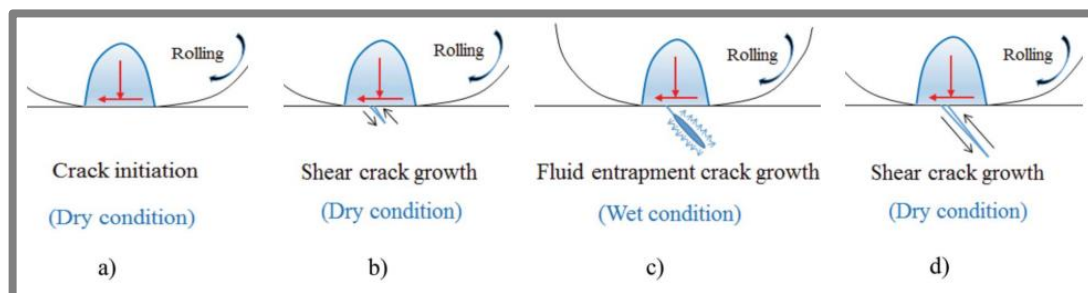
součinitel adheze a negativní třecí charakteristika [6, 20]. Únavové poškození vzniká opakovaným průjezdem kol na kolejnici. Každé kolo při průjezdu vytváří jeden zátěžový cyklus, dokud nedojde k vzniku trhlin na povrchu kola nebo kolejnice.

Experimentální studium opotřebení a únavového poškození provedli Seo a kol. [21]. Pomocí dvoudiskového zařízení s disky o průměru 60 mm a šířce 6 mm testovali vliv aplikace hybridního modifikátoru tření (kombinace vodní a olejové báze) na opotřebení a únavové poškození. Oba disky byly válcové a jejich materiál odpovídal materiálu kola a kolejnice. Rychlost otáčení disků byla nastavena na 500 ot/min a kontaktní tlak na 1100 MPa. Aplikace byla provedena pomocí rozstříku na povrch jednoho z disků. Pro porovnání byly testy prováděny za suchých podmínek, při aplikaci modifikátoru tření a při aplikaci vody (1 kapka za sekundu). Na obr. 2-18a jsou ukázány výsledky testů pro všechny zmíněné podmínky při 1% skluzu. Za suchých podmínek bylo dosaženo stálé hodnoty součinitele adheze 0,4. Při kontinuální aplikaci vody dojde ke snížení součinitele adheze na hodnotu 0,15. Při aplikaci modifikátoru tření dochází k propadu adheze, rychlému nárůstu a výdrži na hodnotě 0,3. Výsledky opotřebení jsou na obr. 2-18b. Velice nízkého a téměř neměnného opotřebení bylo dosaženo s vodou. Při aplikaci modifikátoru tření se opotřebení během prvních 50 000 cyklů drželo na nízké úrovni, avšak poté došlo k výraznému nárůstu. U suchého kontaktu zpočátku opotřebení prudce narostlo a poté v rozsahu od 30 000 do 60 000 cyklů mírně kleslo. Další průběh opotřebení měl rostoucí charakter.



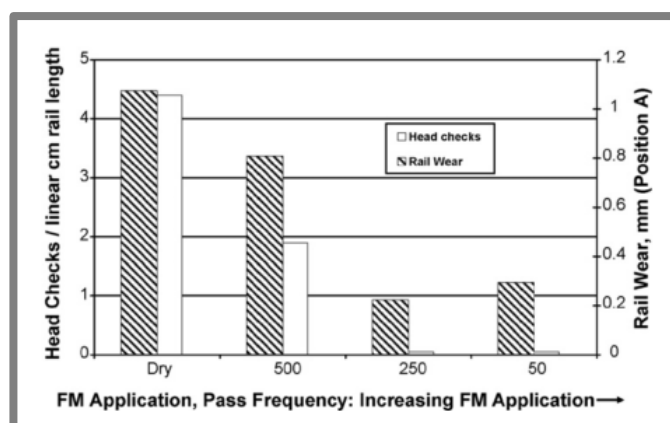
Obr. 2-18 Grafy testovaných podmínek a) součinitel adheze, b) opotřebení – upraveno [21]

Při testech únavového poškození bylo zjištěno, že trhliny způsobené únavovým poškozením vznikly za všech třech testovaných podmínek. Při porovnání vzniku trhlin za mokrých podmínek a při aplikaci modifikátoru tření se ukázalo, že trhliny vznikly dříve při aplikaci modifikátoru. Vysvětlení tohoto jevu spočívá v přechodových podmínkách mezi suchým a mokrým kontaktem vznikajících při použití modifikátoru tření (obr. 2-19). Díky tomu je vznik trhlin podpořen částečně suchými podmínkami. Růst trhlin je poté urychlen při mechanismu, který uzavře kapalinu v trhlíně a pod tlakem dojde k jejímu růstu. Tento problém souvisí s olejovými (příp. hybridními) modifikátory tření. U vodních modifikátorů tření tomu lze částečně zamezit efektivním vyschnutím kompozice.



Obr. 2-19 Rozvoj trhliny a) vznik, b) růst, c) uzavření kapaliny, d) další růst – upraveno [21]

Vliv modifikátorů tření na opotřebení a vznik únavových trhlin byl také studován pomocí full-scale zařízení v práci Eadieho a kol. [22]. Toto zařízení se sestává z železničního kola o průměru 920 mm, pod kterým je hydraulicky posouvaná 1,5 m dlouhá kolejnice. Posun kolejnice může být jednosměrný nebo obousměrný. V této práci byl využit pouze posuv v jednom směru. Jako modifikátor tření byl použit produkt KELTRACK Hirail. Jednotlivé testy se skládaly z 100 000 cyklů simulujících průjezd vozidla. Vertikální zatížení bylo nastaveno na 23 t a laterální zatížení 4 t. Rychlost posuvu kolejnice byla limitována experimentálním zařízením na 1 m/s. Porovnání aplikace v různých intervalech je na obr. 2-20. Při testu bez aplikace modifikátoru tření vznikly na každém centimetru kolejnice přibližně 4 trhliny a opotřebení v měřeném bodě přesahovalo 1 mm. Se zkracujícím se intervalem aplikace modifikátoru tření docházelo k nižšímu počtu trhlin a opotřebení. Při aplikaci každých 250 cyklů již nevznikaly žádné trhliny. Opotřebení kolejnice se s aplikací každých 250 a 50 cyklů již výrazně neměnilo. Z těchto závěrů plyne, že existuje optimální aplikované množství. Při aplikaci vyšší než je optimální množství modifikátoru tření nepřináší žádné další výhody.



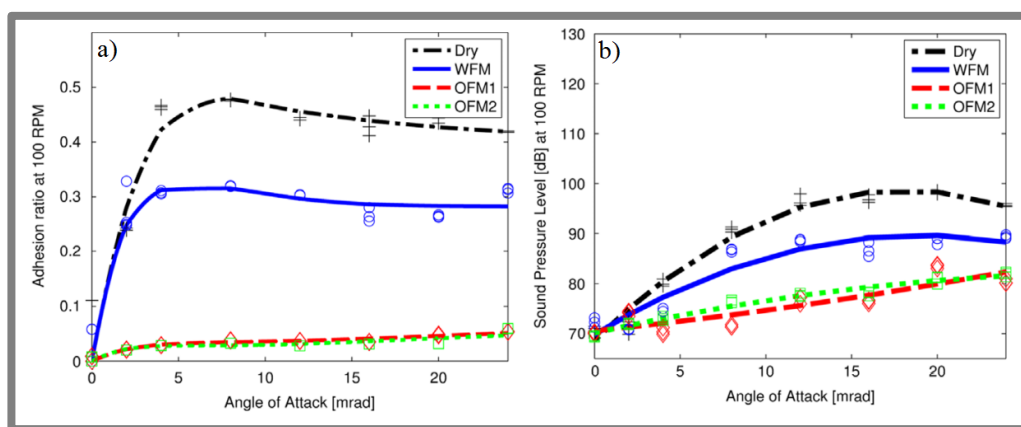
Obr. 2-20 Porovnání opotřebení a počtu trhlin [22]

Navazující publikace využívající stejné full-scale experimentální zařízení zároveň zohlednila kvalitu materiálu kolejnice [23]. Nejmenšího opotřebení a vzniku únavových trhlin bylo dosaženo při využití vodního modifikátoru tření (KELTRACK Hirail) v kombinaci s vysokou kvalitou materiálu kolejnice. Zároveň s touto kombinací vznikaly nejmenší plastické deformace na povrchu testovaného vzorku kolejnice. Vhodným výběrem materiálu kolejnice tedy může být efektivita modifikátoru tření výrazně zvýšena.

### 2.2.3 Redukce hluku

Vysoká míra hluku je jedním z hlavních problémů kolejové dopravy v obydlených oblastech. Za pomoci modifikace tření lze snížit hodnotu součinitele adheze a změnit trend trakční křivky tak, aby bylo zabráněno vzniku hlukových projevů mezi kolem a kolejnicí.

Experimentální měření hluku při průjezdu zatáčkou publikovali autoři Liu a Meehan [24]. Dvoudiskové zařízení s poloměry disku 213 mm a 85 mm (vrcholový rádius 300 m a 40 mm) a s možností natočení disků simulovalo průjezd vozidla zatáčkou. Maximální natočení disku bylo omezeno na 26 mrad. Zatěžovací síla byla nastavena na 1000 N. Menší kolo bylo poháněno elektromotorem a větší kolo se volně otáčelo (skluz v tečném směru byl zanedbatelný). Testovány byly tři modifikátory tření. Jeden vodní (WFM) a dva olejové (OFM1, OFM2). Bližší specifikace použitých modifikátorů tření nebyly uvedeny. Vodní modifikátor tření po aplikaci hodinu vysychal. Závislost poměru laterální a vertikální síly na úhlu náběhu je zobrazena na obr. 2-21a. Poměr těchto sil je s využitím vodního modifikátoru tření snížen na hodnoty okolo 0,3. Olejové modifikátory tření jsou v tomto ohledu ještě efektivnější a dosahují hodnot pod 0,05. Při zvýšení natočení dojde k nárůstu laterálních sil. V případě suchého kontaktu laterální síly rostly s rostoucím úhlem natočení až do 8 mrad. S dalším zvyšováním natočení již laterální síly klesaly. Tento trend byl sledován i pro vodní modifikátor tření, ovšem změna sklonu křivky nastala dříve (při natočení 4 mrad). Pro oba testované olejové modifikátory tření nedocházelo k poklesu laterálních sil při zvyšování úhlu natočení disku.



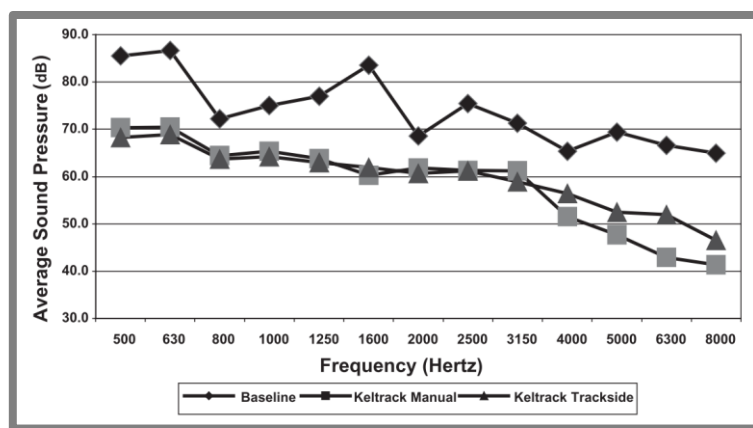
Obr. 2-21 Vliv úhlu náběhu na a) poměr laterální a vertikální síly, b) hluku – upraveno

Úroveň hluku měla podobný trend pro suchý kontakt a modifikátor tření na vodní bázi (obr. 2-21b). Při proložení dat bylo maxima dosaženo pro natočení přibližně 20 mrad. U obou olejových modifikátorů tření došlo k nárůstu hluku s vyšším úhlem natočení. Při vyšších rychlostech se trendy olejových modifikátorů výrazně měnily (při 200, 600 a 800 ot/min docházelo k poklesu úrovně hluku při překročení úhlu natočení přibližně 20 mrad). Zvyšováním rychlostí se hodnoty úrovně hluku pro všechny modifikátory blížily suchému kontaktu. Při vyšších rychlostech tedy byla snížena účinnost modifikátoru na redukci hluku. Autoři jako příčinu tohoto jevu uvádí negativní sklon třecí charakteristiky v laterálním směru (tato charakteristika je ovlivněna úhlem natočení, rychlostí vibrací kola a také teplotou kontaktu). Nelze



ji tedy na základě úhlu natočení zjistit. Pro změření potřebných veličin použité testovací zařízení nebylo uzpůsobeno.

Eadie publikoval tři studie [25–27], ve kterých testoval modifikátor tření na trati. Jako modifikátor tření byl vždy použit produkt KELTRACK od firmy Kelsan. V publikaci [26] byla aplikace prováděna stacionární jednotkou (off-board systém) před traťovým obloukem, případně ruční aplikací. Testování probíhalo na 76 m dlouhém úseku s obloukem o poloměru 25 m. Testovacím vozidlem byla tramvaj o hmotnosti 32 t. Měření hluku bylo provedeno 7,5 m od středu trati ve výšce 1,2 m. Zaznamenán byl celý průjezd vozidla. Výslednou závislost úrovně hluku na frekvenci lze vidět na obr. 2-22. Při použití modifikátoru tření vždy došlo k poklesu hluku v celém rozsahu všech měření. Nejvýraznějšího rozdílu bylo dosaženo ve vysokých frekvencích. V ostatních pracích [25, 27] bylo v nižších frekvencích (do 500 Hz) dosaženo menšího rozdílu mezi suchým kontaktem a modifikátorem tření. Ve vyšších frekvencích vždy docházelo ke znatelnému rozdílu.

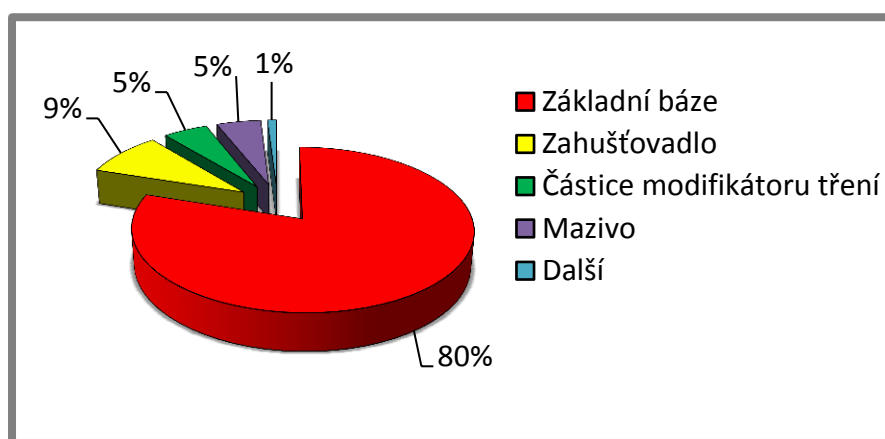


Obr. 2-22 Změna hluku při použití modifikátoru tření [26]

### 2.3 Materiály modifikátorů tření na vodní bázi

Modifikátory tření, používané v publikovaných studiích jsou nejčastěji komerční výrobky, ke kterým nejsou přesná složení a výrobní postupy. Jedinou možností pro zjištění složení těchto kompozic je velmi malé množství patentů. Velká většina patentů je zaměřena na kompozice využívající vodu jako základní bázi. Z patentů lze zjistit přibližné složení modifikátorů tření a postup jejich přípravy. Vlastnosti modifikátorů tření jsou závislé zejména na hmotnostním obsahu jednotlivých složek.

Na obr. 2-23 je přibližné složení modifikátoru tření (hmotnostní obsah jednotlivých složek) na bázi vody vycházející z patentů [28–31]. Jak je patrné, tak největší část modifikátoru tření tvoří základní médium. Množství zahušťovadla, částic pro modifikaci tření a maziva je závislé na požadovaných vlastnostech. Ve většině případů je obsah těchto složek v rozmezí 0–15 hm%. Důležitým hlediskem hodnocení modifikátorů a jejich složek je také jejich biologická nezávadnost. Jednotlivé složky jsou podrobněji popsány v následujících odstavcích.



Obr. 2-23 Složení modifikátoru tření

### 2.3.1 Základní báze

2.3.1

Modifikátory tření jsou na bázi vody nebo oleje, případně jejich kombinace (hybridní) [28]. V případě vody je její účel udržet všechny složky pohromadě a zjednodušit aplikaci modifikátoru tření na povrch kola nebo kolejnice. Samotná voda se po aplikaci odpaří buď přirozeně před průjezdem, nebo po několika průjezdech soupravy. Poté se na koleji vytvoří tenký film, který má požadované vlastnosti.

Modifikátory na bázi olejů mohou být z rostlinných, minerálních nebo syntetických olejů. Výhodou olejových modifikátorů tření je jejich schopnost roznést se na dlouhé vzdálenosti. Naopak vodní modifikátor tření se roznáší jen za mokrého stavu. Po vyschnutí již nedochází k dalšímu roznesení.

### 2.3.2 Zahušťovadlo

2.3.2

Zahušťovadlo je hydrofilní přísada, která absorbuje vodu a způsobí nabobtnání kompozice. Výsledný produkt lépe přilne ke koleji. Důležitou vlastností je také vytvoření homogenního rozložení všech látek v kompozici a zamezení sedimentace částic. Zahušťovadlo mění reologické vlastnosti celé kompozice. Vytvoří dostatečnou tuhost, aby modifikátor zůstal na hlavě kolejnice i po opakovaném přjetí vozidlem. Příklady nejpoužívanějších zahušťovadel [31]:

- bentonit
- kasein

### 2.3.3 Částice modifikátoru tření

2.3.3

Pro zajištění dostatečného přenosu trakčních sil se do modifikátorů přidávají pevné částice. Tyto částice jsou jednou z hlavních složek přidávanou do kompozice a jsou nazvány *částice pro modifikaci tření* (v anglické terminologii je modifikátor tření a částice pro modifikaci tření pod jedním názvem *friction modifier*).

Částice modifikátoru tření je složka práškovitého typu. Pro HPF modifikátory se uvádí nejčastější velikost částic od 0,5 do 5  $\mu\text{m}$ . Přičemž ideální velikost je mezi

1 až 2  $\mu\text{m}$ . Pro VHPF modifikátory může velikost částic dosahovat až 10  $\mu\text{m}$ . Částice by měly umožnit zvýšení součinitele tření mezi kontaktními povrchy. Přičemž součinitel tření by měl dosahovat určitého stanoveného rozmezí. Zároveň by částice měly zajistit pozitivní třecí charakteristiku celkové kompozice. Příklady materiálů částic pro modifikaci tření [30]:

- oxid hlinitý
- uhličitan vápenatý

---

### 2.3.4 Mazivo

Jako mazivo se nejčastěji používají pevná maziva ve formě prášku. Mazivo musí být schopno snížit součinitel tření pod hodnotu 0,1. Přidáním maziva se zároveň sníží opotřebení obou kontaktních povrchů. Jedná se o látky s nízkou smykovou pevností a schopností udržet se na povrchu ve formě tenkého filmu. Příklady maziv [31]:

- grafit
- disulfid molybdenu

---

### 2.3.5 Ostatní

Další přísady modifikátoru tření mohou být například přípravky pro snížení teploty tuhnutí. Tato aditiva pomáhají při využití za nízkých teplot. Nebo přísady pro zlepšení reologických vlastností (uniformní rozložení jednotlivých složek, zlepšení viskozity) modifikátoru, které zároveň mohou fungovat jako zahušťovadla. Další přísadou mohou zabraňovat stárnutí modifikátoru a tím zvýšit jeho životnost a funkčnost. Je třeba zmínit, že jednotlivé složky mohou přispívat ve více oblastech. Tyto poznatky vychází z patentu od Cottera [28].



### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

**3**

---

#### 3.1 Zhodnocení poznatků plynoucích z řešerše

3.1

---

Samotná řešerše zahrnuje základní poznatky přenosu trakčních sil a podstatu utváření mazacího filmu. Také jsou popsány některé důležité práce, zabývající se efektivitou modifikátorů tření. Z řešerše vyplývá, že modifikátory tření jsou efektivním způsobem pro zlepšení adhezních podmínek v kontaktu kola a kolejniče. Řada odborných článků, nejen z laboratorních, ale i reálných experimentů na trati, potvrzuje pozitivní dopad modifikátorů tření zejména na snížení opotřebení a hluku. Značný nárůst využití modifikátorů ve veřejné dopravě indikuje, že se jedná o velice aktuální téma.

Z řešerše složení modifikátorů tření vyplývá, že existuje velké množství kombinací jednotlivých složek. Díky patentům je možné usoudit, které materiály a kombinace složek jsou nejpoužívanější. Pro modifikátory tření na vodní bázi je to zahušťovadlo bentonit, částice pro modifikaci tření mastek a tuhé mazivo disulfid molybdenu [28–32]. Modifikátory tření používané v odborných studiích jsou výhradně komerční produkty. K těmto látkám není dostupné přesné složení. Nelze tedy popsat vliv jednotlivých složek modifikátoru tření na adhezi a opotřebení.

Doposud publikované práce se zabývaly zejména chováním modifikátoru tření ihned po aplikaci do kontaktu (stav, kdy modifikátor tření obsahuje základní bázi, je označován jako *mokrý film*). Vodní modifikátory tření jsou ovšem cíleny na vyschnutí základní báze [28] (*suchý film*). Tyto dva stavy mohou vést na zcela odlišné vlastnosti jak z hlediska adheze, tak i opotřebení.

Parametry experimentů v této práci by měly být voleny s ohledem na skutečné provozní podmínky a experimenty publikované v odborných článcích. Měření z japonských železnic a metra [33] ukazuje, že kontaktní tlak pro nové koleje je přibližně 1000 MPa a pro opotřeбенé koleje 500 až 700 MPa. V řešeršní části se kontaktní tlaky pohybovaly okolo 1000 MPa. Zvolený kontaktní tlak by tedy měl být mezi 500–1000 MPa. Rychlost by měla být zvolena s ohledem na mezní režim mazání. Z hlediska skluzu by se experimenty měly pohybovat nad bodem saturace trakční křivky.

#### 3.2 Cíl diplomové práce

3.2

---

Cílem práce je na základě experimentálního výzkumu objasnit vliv jednotlivých složek modifikátoru tření na adhezi a opotřebení v kontaktu kola a kolejniče.

Vědecká otázka:

„*Jaký je vliv složek obsažených v modifikátoru tření na adhezi v kontaktu kola a kolejniče?*“

Pracovní hypotéza:

„*Pro dosažení dostatečné adheze je nezbytné, aby modifikátor tření obsahoval částice pro modifikaci tření. V případě přítomnosti těchto částic lze očekávat jejich dominantní vliv na adhezi.*“

## 4 MATERIÁL A METODY

V následující kapitole jsou popsány materiály použité v testovaných modifikátorech tření a metodiku jejich přípravy. Dále jsou zde popsány laboratorní zařízení, které byly využity při řešení této práce.

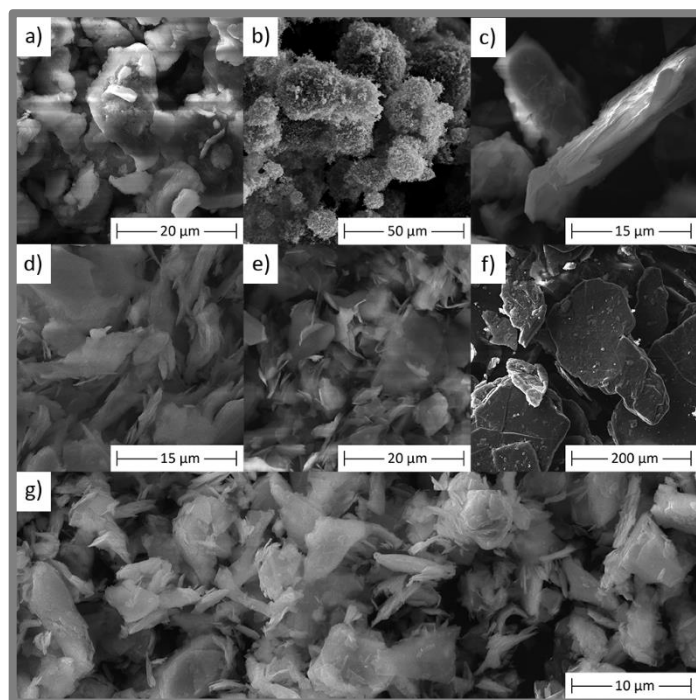
### 4.1 Materiály pro modifikátor tření

Výběr materiálů pro přípravu modifikátorů tření byl založen na dostupných patentech pro modifikátory tření na vodní bázi [28–31]. Z každé kategorie byly vybrány následující reprezentativní složky (obr. 4-1, detailní popis viz tab. 4-1):

- zahušťovadlo – bentonit
- částice pro modifikaci tření – mastek (3 velikosti L, M a S), oxid zinku
- pevné mazivo – Ekolube Molyka RF(disulfid molybdenu), vločkový grafit

Tab. 4-1 Parametry testovaných látek

Látka	Velikost částic ( $\mu\text{m}$ )	Mohsova tvrdost
bentonit	5,5	1
oxid zinku	< 5	4–5
mastek S	D90: 5	1
mastek M	D90: 8,6	1
mastek L	D90: 12,3	1
disulfid molybdenu	D50: 4,2	1–1,5
grafit	7	1–2



Obr. 4-1 a) bentonit, b) oxid zinku, c) mastek L, d) mastek M, e) mastek S, f) grafit, g) molyka

## 4.2 Postup přípravy vzorku

4.2

Příprava vzorků vychází z postupů popsanych v dostupných patentech [29]. Jednotlivé kompozice jsou připraveny a smíchány dle následujícího postupu:

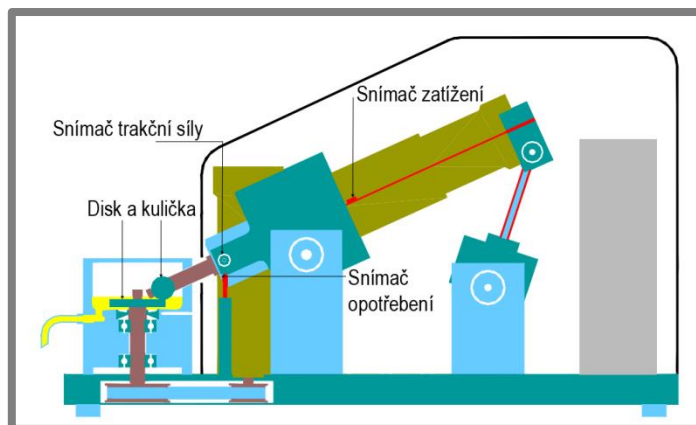
- 50 % vody
- Zahušťovadlo
- Zbytek vody
- Částice pro modifikaci tření
- Pevné mazivo

Pro rozmíchání byla použita magnetická míchačka (pro méně viskózní kompozice) nebo hřídelová míchačka s míchacím nástavcem. Protože bylo vždy připravováno menší množství vzorků, bylo důležité přesně odměřit hmotnosti jednotlivých složek. Pro přesné odměření byla použita analytická laboratorní váha KERN ABJ 320-4NM, která dokáže vážit s přesností na 1 mg.

## 4.3 Hodnocení adhezních vlastností kompozic

4.3

Pro studii adhezního chování modifikátorů bylo využito zařízení Mini Traction Machine (MTM, obr. 4-2) od firmy PCS Instruments, které měří velikost součinitele tření nebo součinitele adheze v závislosti na zvolené konfiguraci. V této práci byla využita konfigurace ball-on-disc. Aparatura vytváří bodový kontakt, kde kulička je zatěžována přes rameno. Kulička a disk jsou nezávisle poháněny servomotorem s převodovkou. Na zařízení MTM se měří třecí síla na rameni s poháněnou kuličkou a společně se známou zatěžující silou software dopočítá součinitel tření. Parametry zařízení jsou uvedeny v tab. 4-2 [34].



Obr. 4-2 Mini Traction Machine [34]

Tab. 4-2 Parametry MTM

Průměr kuličky (mm)	19,05
Průměr disku (mm)	46
Zatížení (N)	0–75
Kontaktní tlak (GPa)	0–1,25
Rychlost (m/s)	–4–4
Skluz (%)	0–200

Na základě rešerše bylo zvoleno zatížení 16 N, které vyvozuje kontaktní tlak 750 MPa. Rychlost byla zvolena 0,3 m/s zejména proto, že zanedbává hydrodynamický účinek mazání nastávající u vyšších rychlostí a zajišťuje mezný režim mazání. Vyšší rychlosti také způsobují přesunutí aplikované dávky odstředivými silami mimo povrch disku. Aby se test z hlediska trakční křivky pohyboval za bodem saturace, byl skluz zvolen 5 %. Všechny zvolené parametry jsou sepsány v tab. 4-3.

Tab. 4-3 Parametry experimentů

Zatížení (N)	16
Kontaktní tlak (GPa)	0,75
Rychlost (m/s)	0,3
Skluz (%)	5

#### 4.4 Hodnocení topografie povrchu

Znalost povrchu kontaktních těles je důležitá nejen pro vizuální identifikaci mechanismů opotřebení, ale známá drsnost povrchu také určuje režim mazání. Pro získání informací o topografii povrchu byl použit optický profilometr Bruker ContourGT-X (obr. 4-3).



Obr. 4-3 Bruker Contour GT-X [36]

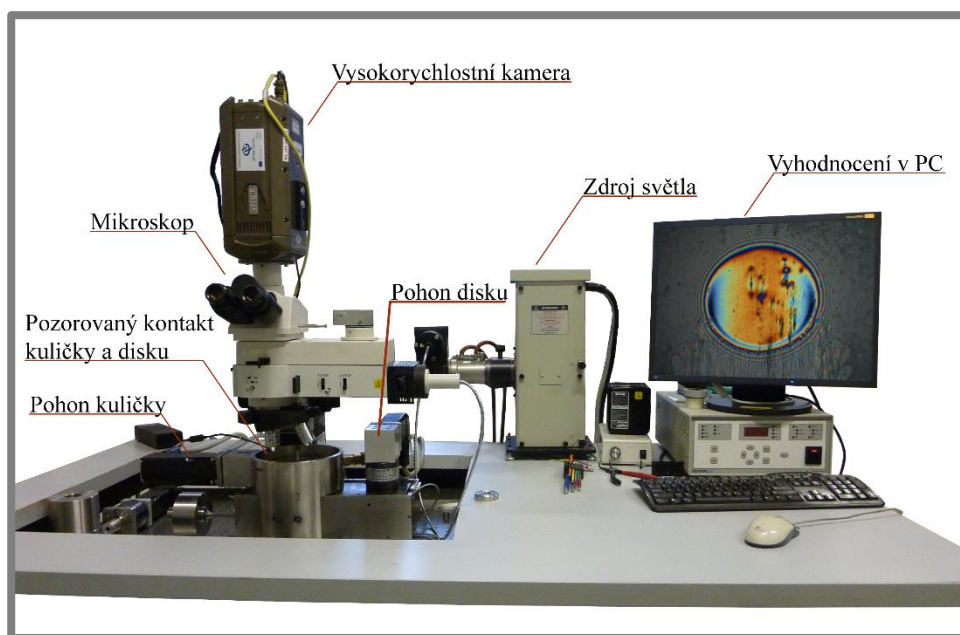
Tento optický profilometr slouží k bezkontaktnímu měření topografie povrchů a vyhodnocování drsností. Profilometr disponuje několika měřicími metodami. *Vertical scanning interferometry* (VSI) metoda je vhodná pro drsné nebo nespojitě povrchy. Pomocí piezo-elektrického posuvu se mění výška skenovací hlavy od povrchu s přesně definovaným krokem, pomocí děliče svazku světla a referenčního zrcátka vzniká interference a snímky z jednotlivých kroků jsou následně vyhodnoceny softwarem [35]. Pro méně drsné povrchy lze použít VSI s vysokým rozlišením (označované jako VXI). Druhou používanou metodou je *phase shifting interferometry* (PSI). Tato metoda se používá pro velice hladké povrchy s vertikálním rozlišením 0,1 nm. PSI využívá monochromatické světlo (obsahuje

jednu vlnovou délku), které putuje soustavou čoček k polopropustnému zrcátku a odtud k děliči svazku. Jedna část svazku putuje k měřenému povrchu a druhá k referenčnímu zrcadlu. Po odražení od povrchu svazky putují do CCD kamery, která snímá jejich interferenci [35, 36]. V této práci byla nejčastěji používána metoda VSI.

#### 4.5 Hodnocení tloušťky mazacího filmu

4.5

Optický tribometr (obr. 4-4) je zařízení určené pro studium mazaných kontaktů. Hlavní části tvoří ocelová kulička a skleněný (příp. safírový) disk. Tato konfigurace simuluje podmínky bodového kontaktu. Tento kontakt je sledován přes průhledný disk pomocí mikroskopu. V mikroskopu je polopropustné zrcadlo, které odráží světlo ze světelného zdroje. Svazek světla putuje do kontaktu a na povrchu disku, který je v kontaktu s kuličkou, je polopropustná chromová vrstva, která část světla odráží. Druhá část světla prochází do kontaktu a odráží se od povrchu ocelové kuličky. Tyto dva svazky způsobují interferenci díky fázovému posunu světla. Tento posun je roven vzdáleností, kterou světlo urazí od povrchu disku ke kuličce a zpět k povrchu disku. Interference je zachycena kamerou a interferenční obrazce jsou zpracovány v programu Achilles. Tento program na základě kalibrace a barevné interference dopočítá tloušťku filmu.



Obr. 4-4 Optický tribometr

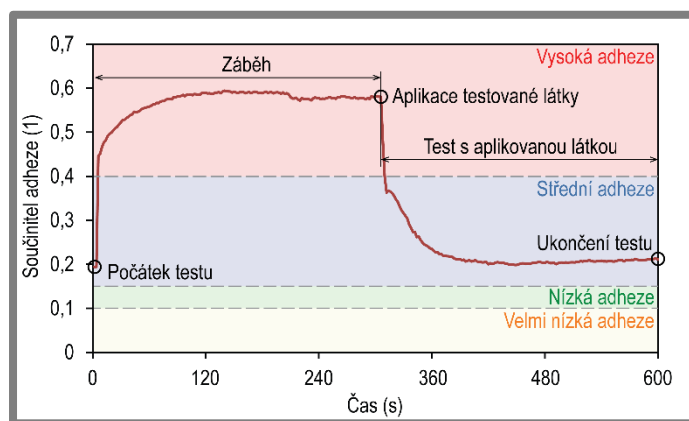
#### 4.6 Postup měření

4.6

Zařízení MTM bylo využito pro studium jak adhezních schopností kompozic, tak pro studium opotřebení. Prvním typem realizovaných testů byly časové testy. Výsledkem těchto testů jsou *adhezní křivky*, které zobrazují závislost změřeného součinitele adheze (tření) na čase. Pro tyto testy byly zvoleny vzorky z ložiskové oceli (označení AISI 52100, ekvivalent ČSN 14109). Výrobce udává tvrdost kuličky v rozmezí 800–900 HV a tvrdost disku 720–780 HV. Tento materiál neodpovídá skutečnému

materiálu kola a kolejnice, nicméně měkčí materiál by vedl k výraznějšímu otěru. Tvrdé částice pro modifikaci tření by bez přítomnosti maziva způsobovaly značné opotřebení a nebylo by možné z hlediska drsnosti zajistit stejné podmínky pro všechny testované kompozice. Drsnost nového disku se pohybovala okolo  $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ . V průběhu všech testů drsnost disku nepřesáhla hodnotu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Drsnost kuličky byla nižší než v případě disku.

Průběh testu je znázorněn na obr. 4-5. První část testu je záběh, který odstraňuje nežádoucí vrstvu oxidů na povrchu disku. Odstraněním této vrstvy vzniknou stejné podmínky před aplikací každé testované látky. Aplikace probíhala pomocí mikropipety nebo injekční stříkačky. Po aplikaci proběhla hlavní část testu. Při testování mokrého filmu byla látka ihned po záběhu aplikována do kontaktu. Naopak při testování suchého filmu byl test zastaven a látka byla aplikována na povrch disku. Po odpaření základní báze byla spuštěna hlavní část testu. Délka hlavní části testu se pohybovala okolo 240 až 300 s. Pro přehlednost je v kapitole výsledky zobrazena pouze část grafu po aplikaci látky. Na obr. 4-5 jsou navíc znázorněny jednotlivé oblasti součinitele adheze, které byly definovány v rešeršní části [1, 37]. Na základě těchto oblastí lze určit, zda má adhezní křivka vhodný průběh pro modifikátory tření.



Obr. 4-5 Adhezní křivky samostatných komponent

Druhý typ testu je test opotřebení. Tyto testy probíhaly 60 minut a cílem bylo určit množství opotřebovaného materiálu a mechanismus opotřebení. Pro tento typ testů byly zvoleny testovací vzorky kuličky a disku z oceli C45 (ekvivalent ČSN 12050) s tvrdostí cca 260 HV. Tento měkčí materiál je velice podobný materiálům používaným pro železniční kola. Na tomto materiálu se výrazněji projevuje mechanismus opotřebení a velikost opotřebovaného materiálu. Drsnost nového disku byla  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ . Velikost opotřebení byla měřena rozdílem hmotností disku před a po testu. Pro mokré film probíhala aplikace modifikátoru tření ihned po začátku a v průběhu testu po překročení limitní hodnoty součinitele adheze. Při testování suchého filmu byl modifikátor tření aplikován na čistý disk před spuštěním testu. Každá další aplikace probíhala zastavením testu, aplikací a vyschnutím stejně jako v případě časových testů. Limitujícím součinitelem adheze pro opětovnou aplikaci byla hodnota 0,4.

Postup měření jednotlivých kompozic je naznačen na obr. 4-6. První testy zahrnovaly naměření adhezních vlastností samostatných složek. Poté se do základního média postupně přidávaly jednotlivé komponenty od nejjednodu-





Obr. 4-6 Postup měření

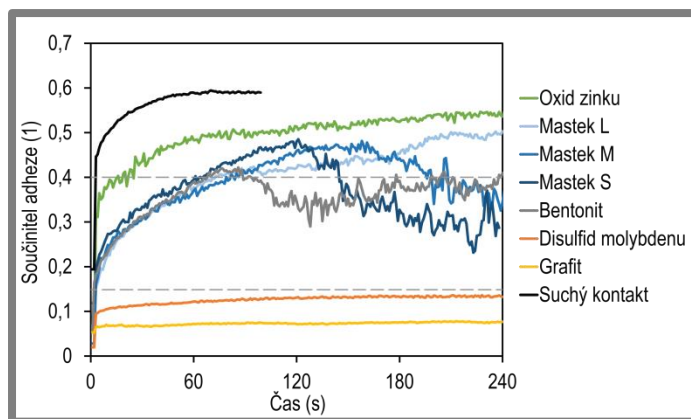
šších složení až po celé kompozice obsahující základní bázi a všechny tři komponenty modifikátoru tření. Testy byly rozděleny z hlediska aplikovaného množství na malé (5  $\mu\text{l}$ , 10  $\mu\text{l}$ , 20  $\mu\text{l}$  a 50  $\mu\text{l}$ ) a velké (1 ml) aplikované množství. Pro aplikaci malého množství byla využita mikropipeta, která umožňuje aplikovat minimální množství 1  $\mu\text{l}$  (maximální chyba  $\pm 0,1 \mu\text{l}$ ). Velké množství bylo dávkováno injekční stříkačkou. Další již zmíněné rozdělení zohledňovalo dva rozdílné stavy modifikátoru tření. Tyto stavy jsou mokrý (přítomnost základní báze v kompozici) a suchý (odpaření základní báze) film. Od některých složení bylo upuštěno zejména proto, že se jeví jako nevhodné pro funkčnost modifikátoru tření (např. přidání maziva do kompozice, která již vykazuje velmi nízké hodnoty adheze). Ostatní vynechané kompozice by nepřinesly nové nebo důležité informace (např. kompozice vody a maziva). Vliv suchého a mokrého filmu, stejně jako vliv aplikovaného množství, byl pro některé kompozice také vynechán. Všechny testované kompozice jsou uvedeny v příloze 1.

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Samostatné komponenty

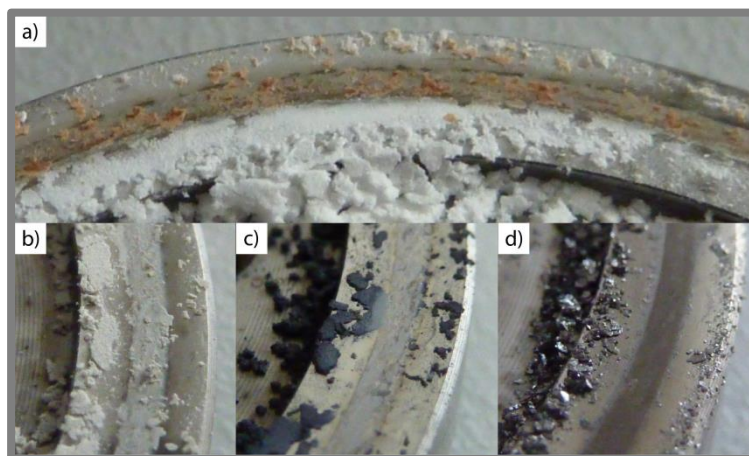
Pro popsání vlivu samostatných složek na adhezi byly jednotlivé komponenty v podobě prášku po záběhovém testu nanесeny na povrch disku. Aby bylo zajištěno úplné pokrytí dráhy kuličky bylo zvoleno množství 0,05 g. Při spuštění testu se přebytečná část aplikovaného množství materiálu po několika cyklech přemístila mimo dráhu.

Minerální částice pro modifikaci tření (mastek) a zahušťovadlo (bentonit) zpočátku popisují stejný trend adhezní křivky (obr. 5-1). V čase 90 s dojde k rozestoupení křivek do rozdílných hodnot adheze. Mastek L obsahuje největší částice a vede na nejvyšší adhezi ze všech testovaných mastků. Mastek M a mastek S potvrzují trend, kde menší částice vedou na menší adhezi. Oxid zinku, který je tvrdší než mastek, v tomto testu vede na nejvyšší hodnotu adheze. Testovaná tuhá maziva vedou na adhezi nižší než 0,15. Vločkový grafit dosahuje nižší hodnoty součinitele adheze než disulfid molybdenu.



Obr. 5-1 Adhezní křivky samostatných komponent

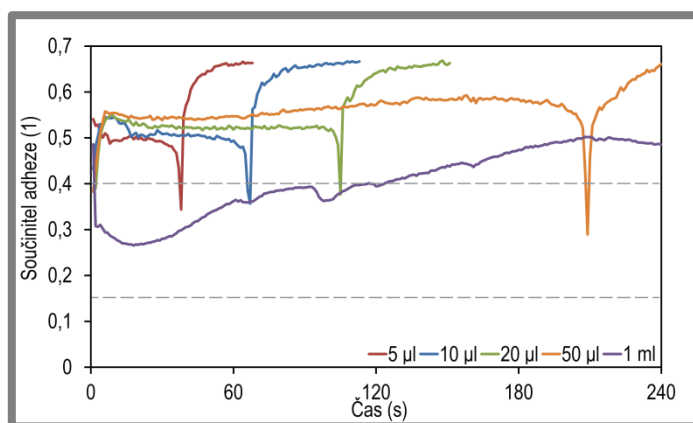
Po ukončení testu s částicemi pro modifikaci tření (mastek, oxid zinku) došlo viditelně ke smísení s částicemi opotřebení (obr. 5-2a, hnědá vrstva). Obě testovaná pevná maziva vytvořila v nerovnostech na dráze tenkou vrstvu (obr. 5-2 c, d).



Obr. 5-2 Vytvořené vrstvy po ukončení experimentu: a) mastek S, b) bentonit, c) disulfid molybdenu, d) grafit



Pro porovnání suchého a mokrého kontaktu byl proveden experiment s aplikací vody. Aplikováno bylo velké množství simulující zaplavení kontaktu a malé množství dávkované mikropipetou. Výsledky experimentů jsou na obr. 5-3. Prvotní pokles součinitele adheze při aplikaci 1 ml dosahuje hodnot 0,3, poté dochází k postupnému růstu. Při aplikaci menších množství dochází k prvotnímu poklesu na hodnoty 0,3–0,4 a rychlému nárůstu, který končí na hodnotách 0,5 (pro 5  $\mu$ l) až 0,55 (pro 50  $\mu$ l). Tato hodnota je konstantní dokud nedojde k přechodu na suchý kontakt, kde je doprovázen krátkým propadem součinitele adheze.



Obr. 5-3 Adhezní křivky vody (mokrý film)

## 5.2 Dvousložkové kompozice

Následující kapitola popisuje adhezní chování dvousložkových kompozic (příloha 1, kompozice č. 1–12). Pro tyto kompozice nebyly prováděny testy suchého filmu, jelikož chování těchto kompozic odpovídalo testům samostatných komponent.

5.2

### 5.2.1 Velké aplikované množství, mokrý film

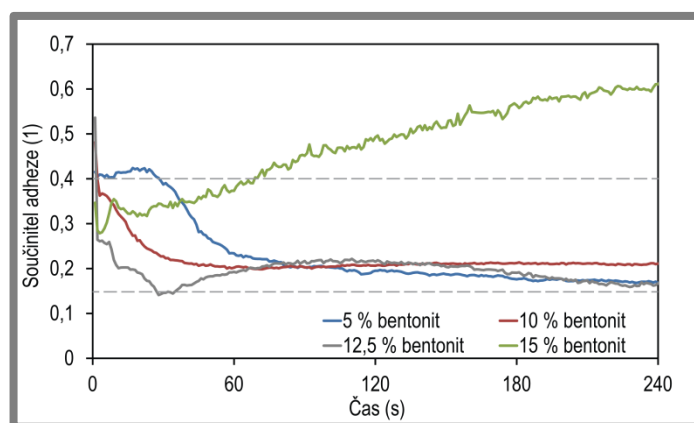
První testovaná kompozice je směs vody a zahušťovadla (bentonit). Bentonit zvyšuje viskozitu celé kompozice a je určen pro vytvoření homogenní disperze částic modifikátoru tření. Z patentů vyplívá, že nejvyšší používané množství zahušťovadla je okolo 15 %. První připravené kompozice ukázaly, že při 15% hmotnostním poměru zahušťovadla s vodou se vytváří tuhá pasta. Pro porovnání reologických vlastností byly vzorky otestovány na rotačním viskozimetru HAAKE Rotovisco 1. Změnu viskozity v závislosti na množství bentonitu lze vidět v tab. 5-1.

5.2.1

Tab. 5-1 Viskozita vody a bentonitu

Množství bentonitu (hm. %)	Zdánlivá viskozita (Pa·s)
5 % bentonit	0,028
7,5 % bentonit	0,185
10 % bentonit	1,364
15 % bentonit	12,033

Obr. 5-4 ukazuje výsledky z adhezních testů kompozice vody a bentonitu. Z grafu je patrné, že při 15 % zahušťovadla došlo v měřeném rozmezí 240 s k plynulému přechodu na hodnotu adheze suchého kontaktu. Tento jev je způsoben tím, že vysoký obsah bentonitu, a s tím spojená vysoká viskozita (tab. 5-1), brání aplikovanému množství v udržení plného zaplavení kontaktu. Během prvních několika otáček byla kompozice vytlačena mimo dráhu (obr. 5-5a) a po zbytek testu docházelo k pomalému růstu součinitele adheze. Ke konci testu byla mezi kuličkou a diskem nepatrná vrstva aplikované kompozice, která nedokázala ovlivnit součinitel adheze (obr. 5-5c). Na rozdíl od kompozice s 5 % bentonitu, kde větší množství vody a nižší viskozita umožnili kompozici opětovné zaplavení kontaktu (obr. 5-5b). Kritická hranice, kdy dojde ke zmiňovanému jevu, nastává mezi 12,5 % a 15 % zahušťovadla. Ostatní testované složení (5–12,5 % zahušťovadla) vykazují takřka stejné vlastnosti. V první minutě dochází k pozvolnému snižování adheze. Poté se součinitel adheze ustálí okolo hodnoty 0,2. Mimo složení s 15 % bentonitu lze také pozorovat, že prvotní pokles adheze roste s vyšším množstvím zahušťovadla v kompozici.

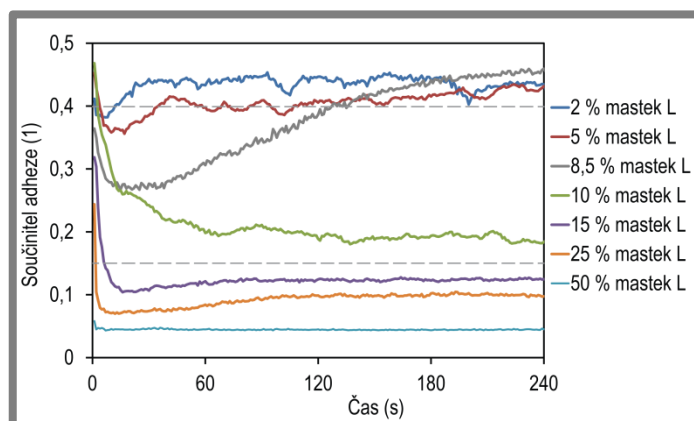


Obr. 5-4 Adhezní křivky kompozice vody a bentonitu (1 ml, mokrý film)



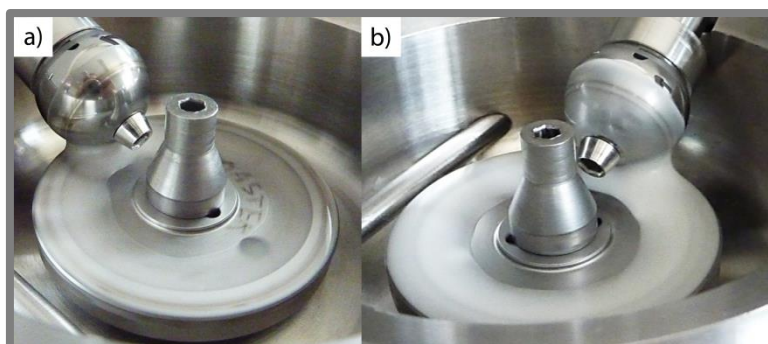
Obr. 5-5 Detaily a) kuličky po testu s 15 % bentonitu, b) disku po testu s 5 % bentonitu, c) disku po testu s 15 % bentonitu (1 ml, mokrý film)

Druhou testovanou kompozicí byla voda s částicemi pro modifikaci tření. Pro testování byly zvoleny částice mastek L ( $4,7 \mu\text{m}$ ). Experimenty ukázaly, že s rostoucím množstvím částic pro modifikaci tření dochází k poklesu adheze v kontaktu. Kompozice s 2 % a 5 % mastku L udržely adhezi nad hodnotou 0,4 během celého testu (obr. 5-6). Lze předpokládat, že toto malé množství částic pro modifikaci tření nemá takřka žádný vliv na adhezi v kontaktu. Pro 8,5 % mastku



Obr. 5-6 Adhezní křivky kompozice vody a mastku L (1 ml, mokrý film)

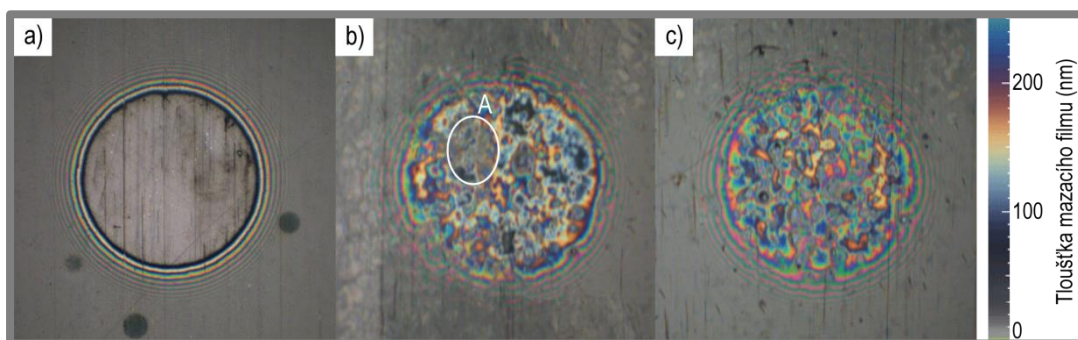
dochází k výraznějšímu propadu adheze po aplikaci (pod hodnotu 0,3), avšak během testu dochází k pomalému nárůstu součinitele adheze až k hodnotám stejným jako u obou již zmíněných testovaných kompozic (2 % a 5 % mastku L). Mezi 8,5 % a 10 % mastku dochází k výraznému poklesu adheze i přesto, že počáteční propad u obou těchto složení se pohybuje kolem hodnoty 0,25. Porovnání testovaných kompozic s 2% a 10% obsahem mastku L při testu lze vidět na obr. 5-7. Vyšší hodnoty mastku (15 % a 25 %) dodržují trend a vedou na nižší součinitel adheze. Kompozice, ve které polovinu hmotnosti zabírá mastek, dosáhla nejvyššího propadu na součinitel adheze 0,05 po celou dobu testu.



Obr. 5-7 Průběh měření s 2 % mastku L (vlevo) a 10% mastku L (vpravo) (mokrý film)

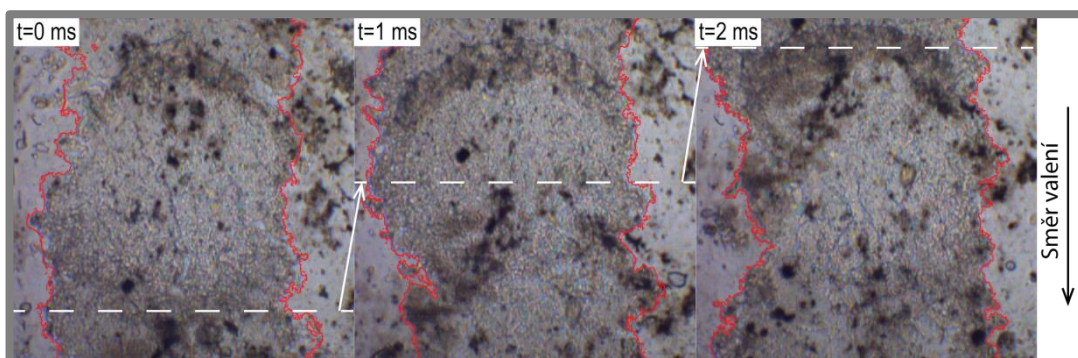
Pro popsání mechanismů ovlivňujících součinitel adheze v kontaktu byly vybrané kompozice sledovány na optickém tribometru. Podmínky testování byly stejné jako v případě adhezních křivek (zatížení 0,75 GPa, rychlost 300 mm/s a skluz 5 %). Z důvodů opotřebení ložiskové kuličky a chromové vrstvy na disku byly testy prováděny po krátkou dobu (maximálně 5 s). Samotné opotřebení znehodnocuje kvalitu zaznamenaných snímků (rýhy na chromové vrstvě a kuličce). Dráha kuličky je delší než u zařízení MTM (kulička je v kontaktu s diskem na větším poloměru), proto bylo aplikované množství zvětšeno na cca 10 ml pro zajištění zaplavení celého kontaktu.

Na obr. 5-8a je pro srovnání statický snímek kontaktu zaplaveného vodou. Samotná voda dosahuje tloušťky filmu v rámci několika desítek nanometrů při rychlostech do 1 m/s. Je třeba zmínit, že kalibrace aparatury byla provedena pro vodou zaplavený kontakt (pro kalibraci je důležitý index lomu měřené kapaliny), proto se tloušťky mazacího filmu kompozic s bentonitem mohou lišit od skutečnosti. Zároveň jsou drsnosti kontaktních těles mnohem menší než v případě zařízení MTM. Protože je sledován vstup částic do kontaktu a relativní změna tloušťky mazacího filmu jsou zmíněné nepřesnosti zanedbatelné. U kompozice s 10 % bentonitu (obr. 5-8b) lze pozorovat, že většina kontaktní oblasti je oddělena mazacím filmem o tloušťce přes sto nanometrů. V levé horní části kontaktu (místo A) je patrná šedá oblast, která značí úplné oddělení kontaktních povrchů shlukem částic. Kompozice s 15 % bentonitu (obr. 5-8c) taktéž vytvořila mazací film oddělující kontaktní tělesa. Ze snímku lze pozorovat posun barevného spektra do vyšších hodnot tloušťky mazacího filmu. Jelikož test probíhal jen krátkou chvíli a bylo aplikované velké množství kompozice, nebylo možné sledovat vytlačení kompozice mimo dráhu kuličky a přechod do suchého kontaktu jako v případě adhezních testů na MTM.



**Obr. 5-8** Snímky z kolorimetrické interferometrie: a) statický kontakt s vodou, b) 10 % bentonitu, c) 15 % bentonitu (mokrý film)

Pro testování mastku byla vybrána kompozice s 15 % mastku L. Disk s vrstvou chromu byl zaměněn za skleněný disk bez chromové vrstvy. Použití tohoto disku umožňuje lépe sledovat rozhraní mezi kontaktními tělesy, avšak neumožňuje pozorovat tloušťku mazacího filmu. Test probíhal stejně jako v případě vody a bentonitu. Voda s 15 % mastku L vytvářela tenkou vrstvu mezi kontaktními tělesy (obr. 5-9). Na obrázku jsou okraje vrstvy naznačené červenou čarou. Posun kontaktu je naznačen přerušovanými čarami. Vzniklá vrstva se při průchodu kontaktem deformovala, ovšem nebylo znatelné její porušení. Při testu bylo zároveň



**Obr. 5-9** Zobrazení vrstvy vytvořené kompozicí vody a 15 % mastku (mokrý film)



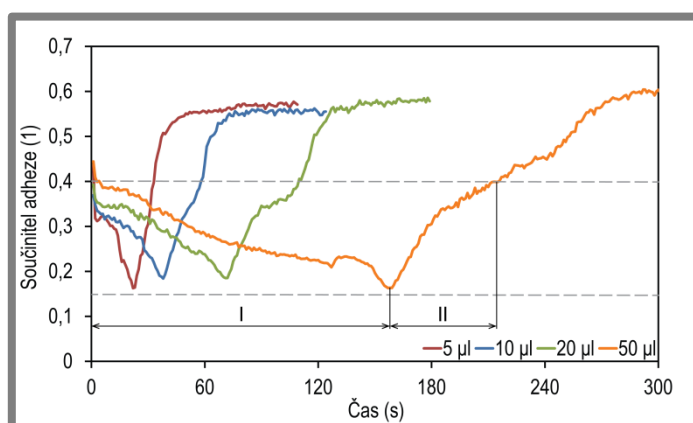
pozorováno, že znatelná část částic jde mimo kontaktní oblast.

### 5.2.2 Malé aplikované množství, mokrý film

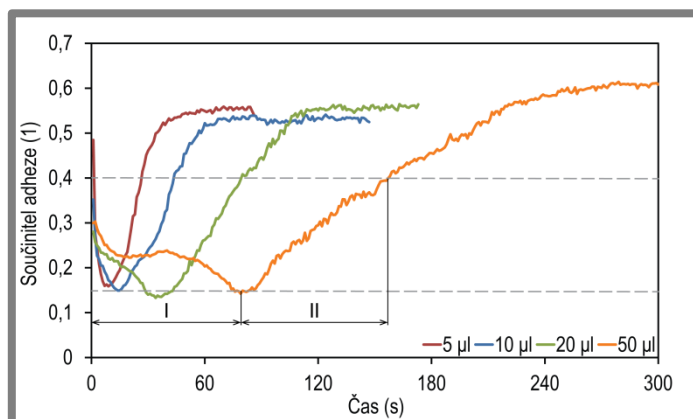
5.2.2

Pro aplikaci malého množství kompozice byla využita mikropipeta. Prvotní testy ukázaly, že při aplikovaném množství menším než 5  $\mu\text{l}$  dochází k zanedbatelnému poklesu součinitele adheze. Aby byl patrný průběh adhezni křivky delší než 10 s bylo nejmenší aplikované množství zvoleno 5  $\mu\text{l}$ . Největší aplikované množství bylo zvoleno 50  $\mu\text{l}$ . Při větším množství by se jednalo o takřka zaplavené podmínky, což není pro reálný kontakt typické.

Kompozice vody a bentonitu byla testována ve třech složeních (5 % bentonitu, 10 % bentonitu a 15 % bentonitu). U všech složení bylo patrné rozdělení adhezni křivek do dvou oblastí (v grafech označeny jako oblast I a II). Během prvních 5 s po aplikaci došlo k poklesu součinitele adheze do hodnot mezi 0,3 a 0,4 v případě 5 % bentonitu (obr. 5-10). Nižších hodnot součinitele adheze po aplikaci bylo dosaženo s 10 % bentonitu (obr. 5-11) a 15 % bentonitu (obr. 5-14). Poté docházelo k postupnému snižování součinitele adheze (oblast I). Délka této oblasti se snižovala se zvyšujícím se množstvím bentonitu. Po dosažení nejnižšího součinitele adheze (pro všechny tři testované kompozice okolo 0,15) se křivka dostala do oblasti postupného nárůstu adheze (oblast II). Konec této oblasti je definován překročením

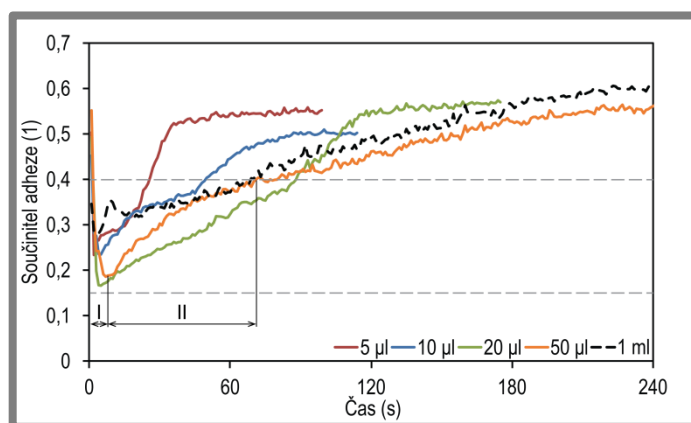


**Obr. 5-10** Adhezni křivky kompozice vody a 5 % bentonitu (mokrý film)



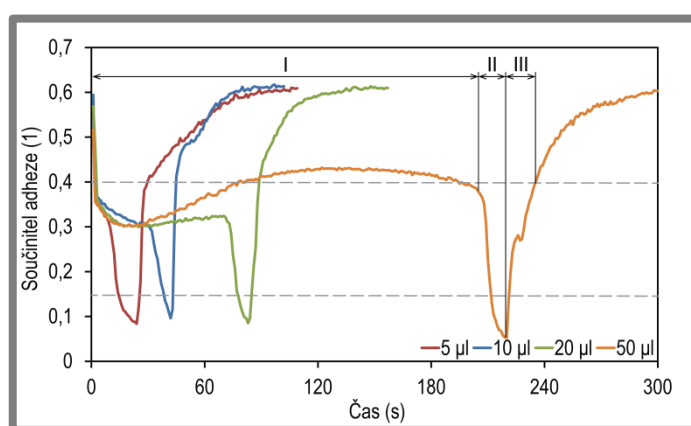
**Obr. 5-11** Adhezni křivky kompozice vody a 10 % bentonitu (mokrý film)

optimálního součinitele adheze, který byl v rešerši definován hodnotou 0,4. Zároveň se tento úsek (II) dá popsat jako postupný přechod do suchého kontaktu. Postupným vysycháním kompozice zůstaly na dráze pouze částice bentonitu a opotřebení. Jako zlomový bod, kde dojde k vyschnutí kompozice, lze označit přechod mezi oblastmi I a II. Při aplikaci 50  $\mu\text{l}$  vody a 15 % bentonitu se průběh adheze podobal aplikaci 1 ml (obr. 5-12). Důležitým zjištěním je, že rozdílné složení a aplikované množství neovlivňuje minimální hodnotu součinitele adheze.



**Obr. 5-12** Adhezní křivky kompozice vody a 15 % bentonitu (mokřý film)

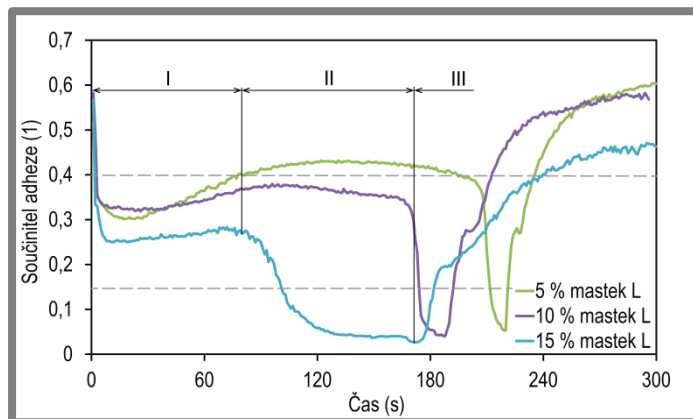
Zcela odlišně se chovaly kompozice s mastkem. Po aplikaci 50  $\mu\text{l}$  kompozice s vodou a 5 % mastku L dojde k propadu součinitele adheze na hodnotu 0,3 a v průběhu následujících 200 s nastává nárůst na hodnotu mírně přesahující 0,4 (obr. 5-13, oblast I). Poté dojde k propadu součinitele adheze k hodnotám 0,05 (oblast II) a opětovnému nárůstu (oblast III) až do hodnot suchého kontaktu. Množství aplikované kompozice nemá znatelný vliv na ustálenou hodnotu v úseku I a délka propadu adheze (úsek II a III) je také neovlivněna.



**Obr. 5-13** Adhezní křivky kompozice vody a 5 % mastku L (mokřý film)

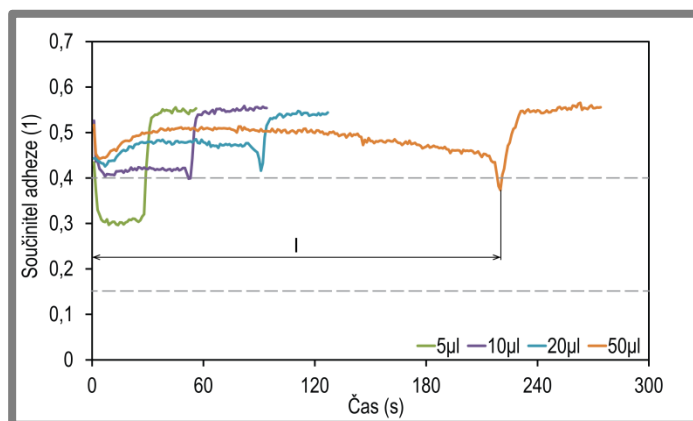
Rozdílné množství mastku L má výrazný vliv na délku propadu adheze (úsek II). S rostoucím množstvím mastku roste délka propadu adheze (obr. 5-14, úsek II) a zkracuje se oblast stabilní hodnoty adheze (I). Jelikož vyšší obsah mastku snižuje

množství aplikované vody, dochází k přechodu do suchých hodnot součinitele adheze mnohem dříve (nejvýraznější skok je mezi 5 % a 10 % mastku L). Velikost součinitele adheze ve stabilní oblasti (I) dosahuje nižších hodnot se zvyšujícím se množstvím mastku.



**Obr. 5-14** Adhezní křivky kompozice vody a mastku L (50 µl, mokrý film)

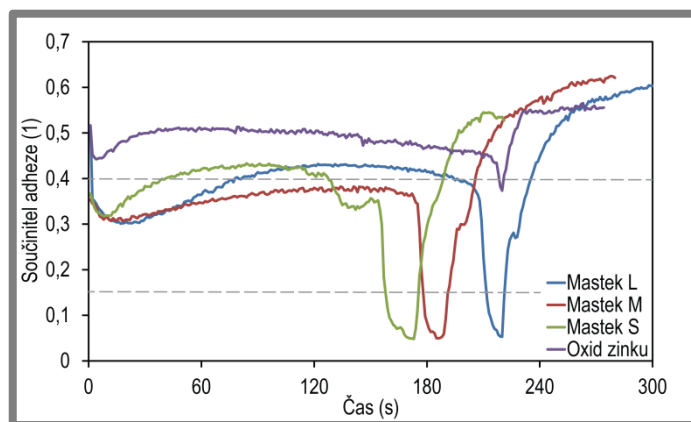
Kovové částice zinku při větších aplikovaných množstvích dosahují vyšších hodnot součinitele adheze (obr. 5-15). Při aplikaci 5 µl dojde k poklesu a výdrži na součiniteli adheze 0,3. Poté dojde ke skokové změně na suchý kontakt. Se zvyšujícím se aplikovaným množstvím roste hodnota prvotního propadu a prodlužuje se efektivní doba působení. Od 10 µl je přesáhnut součinitel adheze 0,4. Čas mezi aplikací a přechodem na suchý kontakt mezi 5 % mastku L (obr. 5-13, oblast I a II) a 5 % oxidu zinku (obr. 5-15, oblast I) je vždy stejný s minimální odchylkou (v průměru byl sledovaný čas kompozice s oxidem zinku vyšší o 5 s).



**Obr. 5-15** Adhezní křivky kompozice vody a 5 % oxidu zinku (mokrý film)

Stejně testy byly provedeny pro 5 % mastku M a 5 % mastku S. Tvar adhezních křivek pro obě kompozice byl stejný jako v případě mastku L. Největší rozdíl nastal u mastku S, kde při nižších aplikovaných množstvích docházelo ke snížení minimální hodnoty adheze. Další rozdíl byl v časovém zkrácení křivek při nižších velikostech částic mastku (obr. 5-16). Z obrázku je také patrné, že čas kdy dojde k přechodu na suchý kontakt je v případě mastku L a oxidu zinku stejný, jak bylo zmíněno

v předchozím odstavci. Stabilní hodnota adheze se při zvětšení částic mastku nemění (stále se drží mezi 0,3 a 0,4). Nejdůležitější rozdíl tedy je, že při zmenšení velikosti částic dochází rychleji k vyschnutí kompozice.



**Obr. 5-16** Adhezní křivky kompozice vody a částic pro modifikaci tření (50 µl, mokrá film)

### 5.3 Třísluškové kompozice

Testování třísluškových kompozic bylo provedeno jak při mokrému tak i suchém filmu. Suchý film byl testován u kompozic s mazivem, jelikož bez maziva bylo dosaženo součinitele adheze výrazně přesahujícího 0,4. Takovéto hodnoty jsou pro modifikátory tření nevhodné.

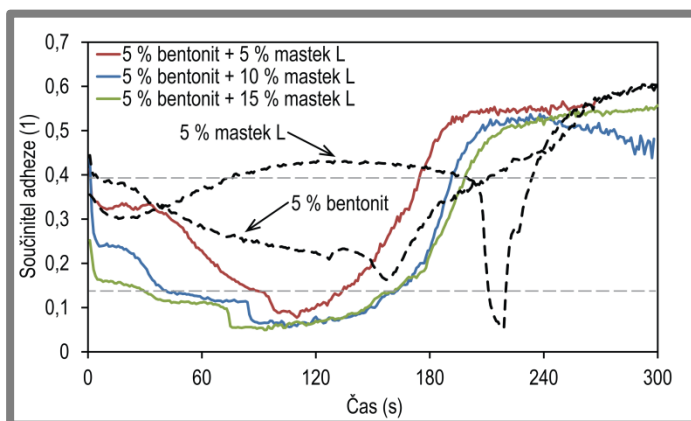
#### 5.3.1 Velké aplikované množství, mokrá film

Aplikace 1 ml třísluškové kompozice byla provedena pro složení voda, bentonit a mastek L. Testované množství zahušťovadla bylo 5 %, 10 % a 15 %. Ke každému množství zahušťovadla poté bylo přidáno 5 %, 10 % a 15 % mastku L (kompozice č. 13–21). Kompozice s 5 % bentonitu vždy dosáhla součinitele adheze pod 0,1, bez ohledu na množství mastku v kompozici. Mezi jednotlivými křivkami nebyly znatelné rozdíly ve velikosti součinitele adheze. V případě kompozice s 10 % bentonitu již byly znatelné rozdíly při různém množství mastku. Větší množství mastku vedlo na nižší hodnoty součinitele adheze (cca 0,1). Při 5% obsahu mastku bylo dosaženo stabilní hodnoty součinitele adheze 0,15. Kompozice s 15 % bentonitu (kompozice č. 19–21) vedla ve všech případech na pomalý přechod na suchý kontakt a nedošlo k ustálení součinitele adheze. Stejně jako složení vody a vyššího množství bentonitu došlo k vytlačení kompozice mimo dráhu kuličky. Postupem času poté díky prokluzu mezi kuličkou a diskem docházelo k odstraňování vrstvy mezi kontaktními tělesy. Přidáním mastku ovšem došlo k pomalejšímu růstu adheze. Čas překročení horní hranice optimální hodnoty součinitele adheze je ovšem pro všechny tři testované kompozice (kompozice č. 19–21) stejný (cca 180 s). Všechny zmíněné kompozice vykazovaly nevhodný průběh adhezních křivek.

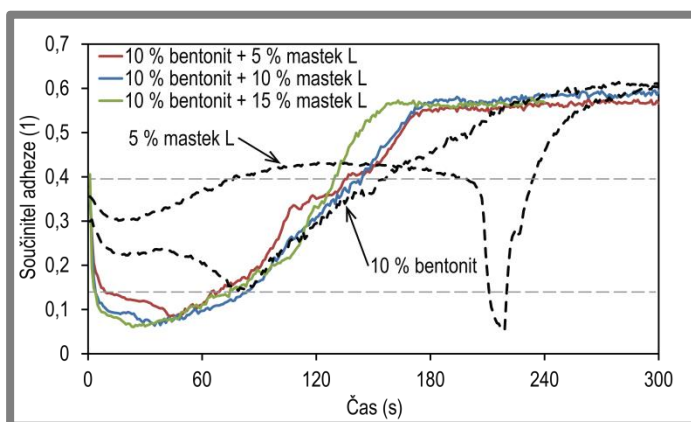


### 5.3.2 Malé aplikované množství, mokřý film

Aplikace 50  $\mu$ l kompozice bentonitu a mastku L ve všech složeních vedla na propad součinitele adheze pod hodnotu 0,1 (obr. 5-17 a obr. 5-18). Vyšší množství mastku způsobilo nižší součinitel adheze. Všechna složení dosahovala podobných dob efektivního působení. Menší množství mastku v kompozici s 5 % bentonitu vedlo na kratší dobu efektivního působení. V kompozici s 10 % bentonitu je trend opačný, avšak skoro nerozpoznatelný. V porovnání s kompozicemi obsahujícím samotný bentonit nebo samotný mastek L (v grafech vyznačeny přerušovanou čarou) lze jednoznačně říci, že dominantním prvkem v kompozici je zahušťovadlo bentonit.



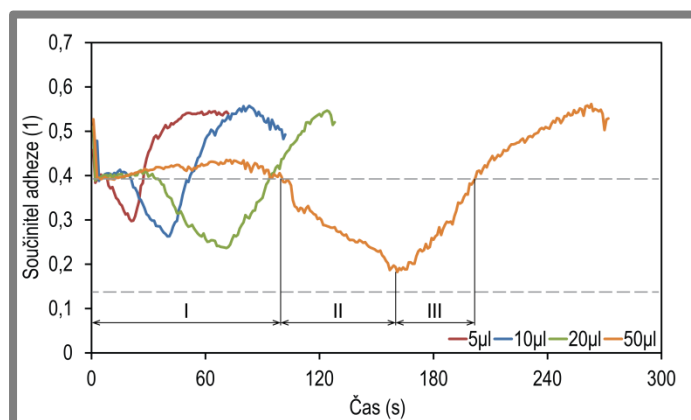
Obr. 5-17 Adhezní křivky kompozice vody, 5 % bentonitu a mastku L (50  $\mu$ l, mokřý film)



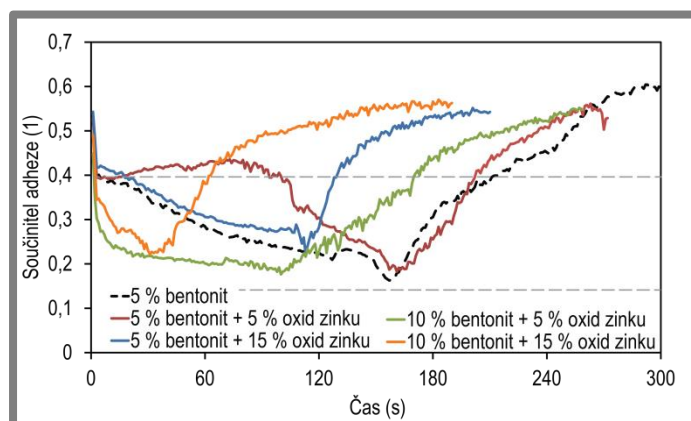
Obr. 5-18 Adhezní křivky kompozice vody, 10 % bentonitu a mastku L (50  $\mu$ l, mokřý film)

Využitím 5 % oxidu zinku jako částic pro modifikaci tření dojde k nárůstu a stabilizaci součinitele adheze v první části adhezní křivky (obr. 5-19, oblast I). Tato stabilní část se ovšem objevila pouze u kompozice s 5 % bentonitu a 5 % oxidu zinku. Zvýšením aplikovaného množství dojde k prodloužení stabilní části. Součinitel adheze se v této oblasti nemění. Druhou oblastí (II) je pokles součinitele adheze. Zvyšováním aplikovaného množství se minimální hodnota součinitele adheze snižuje. V rozsahu testovaných množství nedošlo k poklesu součinitele adheze pod hodnotu 0,15. Zvýšením množství oxidu zinku na 15 % dojde k odstranění stabilní části adhezní křivky (I) a výraznému zkrácení efektivní doby působení (obr. 5-20). Minimální hodnota součinitele adheze se přidáním oxidu zinku nepatrně zvýší.

Zvýšením obsahu bentonitu na 10 % dojde v první části adhezni křivky k většímu a prudšímu poklesu adheze. Kompozice s 10 % bentonitu a 5 % oxidu zinku se po prvotním poklesu ustálí na součiniteli adheze okolo 0,2. Po dosažení minimální hodnoty adheze (cca 100 s) dojde k pomalému přechodu na suchý kontakt. Zvýšením obsahu oxidu zinku na 15 % opět dojde k odstranění stabilní části křivky a výraznému zkrácení efektivní doby působení. Efektivní doba působení je ovlivněna zejména množstvím vody v kompozici. Samotné složení kompozice nehraje zásadní roli. Kompozice s 5 % bentonitu a 5 % oxidu zinku v oblasti nárůstu součinitele adheze odpovídá kompozici s 5 % bentonitu. Společnými prvky jsou zejména čas a velikost dosažení minimální hodnoty součinitele adheze a průběh přechodu na suchou hodnotu součinitele adheze.



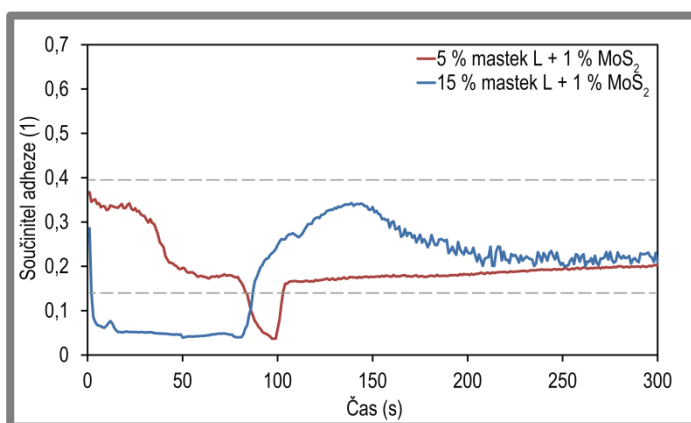
**Obr. 5-19** Adhezni křivky kompozice vody, 5 % bentonitu a 5 % oxidu zinku (mokrý film)



**Obr. 5-20** Adhezni křivky kompozice vody, bentonitu a oxidu zinku (50 μl, mokrý film)

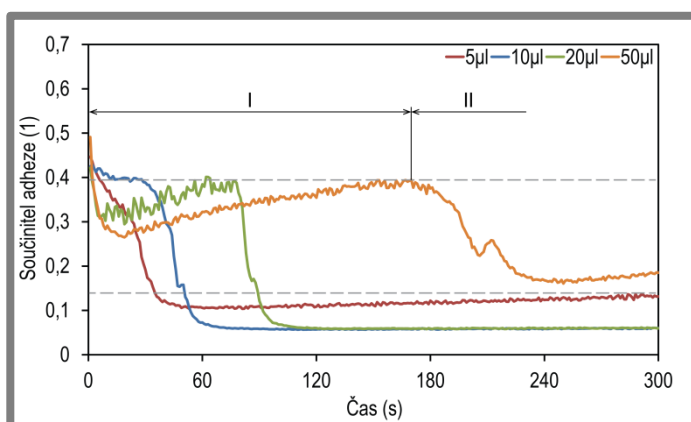
Testované kompozice vody a mastku ukázaly, že nezávisle na aplikovaném množství vždy dojde k výraznému propadu adheze do hodnot nižších než 0,1. Přidáním maziva do mokrého filmu této kompozice by hodnoty součinitele adheze byly výrazně nižší. Byly provedeny dva testy, které tento předpoklad potvrdily. První testovaná kompozice se skládala z 5 % mastku L a 1 % disulfidu molybdenu. Druhá testovaná kompozice obsahovala 15 % mastku L a 1 % disulfidu molybdenu. Menší množství mastku zajistilo pomalejší pokles součinitele adheze pod hodnotu 0,05 (obr. 5-21). Větší množství mastku tento proces urychlilo a ihned po aplikaci došlo k propadu

součinitele adheze pod hodnoty 0,05. Kompozice obsahující 5 % mastku v čase 100 s skokově změnila součinitel adheze na hodnotu 0,16 a ve zbytku testu tato hodnota pomalu rostla. Vyšší množství mastku zajistilo rychlejší nárůst adheze. Došlo ovšem ke smísení s částicemi opotřebení a pomalému poklesu do hodnot podobných jako v případě 5 % mastku (smísení s částicemi opotřebení je patrné v době cca 150 s). Zvýšením aplikovaného množství se pouze prodlužovala část křivky, než došlo k nárůstu adheze. Samotný tvar křivky se neměnil.



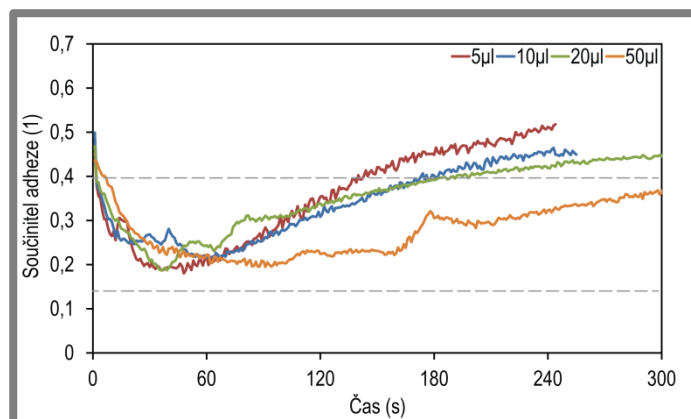
**Obr. 5-21** Adhezni křivky kompozice vody, mastku L a disulfidu molybdenu (20 µl, mokřý film)

Mnohem zajímavější se z hlediska využití maziva u mokřého filmu jeví tvrdé částice oxidu zinku. Tyto částice v kombinaci s vodou dosahovaly vysokých hodnot součinitele adheze. Kompozice s 5 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (obr. 5-22) při nižších aplikovaných množstvích vždy dosáhla velice nízké hodnoty součinitele adheze. Pouze aplikace 50 µl zajistila součinitel adheze větší než 0,15 v průběhu celého testu. Se zvýšením aplikovaného množství se zvětšovala oblast I, kde součinitel adheze postupně narůstal od hodnot 0,3 až do 0,4. Tato oblast byla výraznější pouze u aplikace 20 a 50 µl. Druhou část adhezni křivky (II) tvořil pokles a ustálení součinitele adheze. Stejně jako v případě kompozice s 5 % bentonitu a 5 % oxidu zinku (obr. 5-19) je počáteční část adhezni křivky řízena částicemi oxidu zinku.



**Obr. 5-22** Adhezni křivky kompozice vody, 5 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (mokřý film)

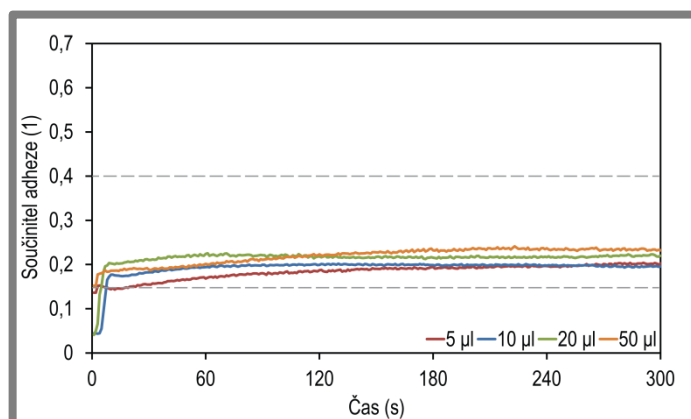
Zvýšením podílu částic oxidu zinku na 15 % došlo ke změně počáteční oblasti ustálené hodnoty adheze (obr. 5-23). Zároveň byla odstraněna oblast nízkého součinitele adheze. Velikost aplikovaného množství neměla vliv na minimální hodnotu součinitele adheze, avšak měla vliv na efektivní dobu působení kompozice. Nejvýraznější rozdíl nastal u aplikace 50  $\mu\text{l}$ , kde v průběhu celého testu dlouhého 300 s nedošlo k nárůstu součinitele adheze nad hodnotu 0,4.



**Obr. 5-23** Adhezní křivky kompozice vody, 15 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (mokrý film)

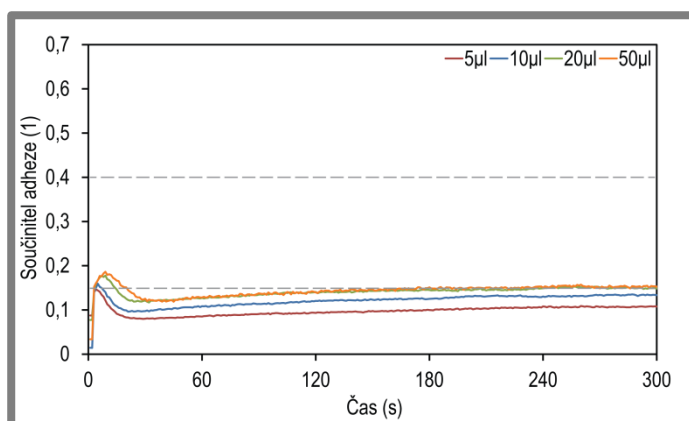
### 5.3.3 Malé aplikované množství, suchý film

První sada testů porovnávala zvolená maziva. Byly vytvořeny dvě kompozice obsahující 5 % mastku L a 1 % maziva (disulfid molybdenu a grafit). Kompozice obsahující 1 % disulfidu molybdenu ve všech aplikovaných množstvích dosáhla součinitele adheze vyššího než 0,15 (obr. 5-24). Po prvotním skokovém nárůstu došlo k jeho ustálení po celou dobu testu. Se zvyšujícím se aplikovaným množstvím nepatrně rostla velikost součinitele adheze. Na konci testu dosahovaly hodnoty součinitele adheze od 0,2–0,23 v závislosti na aplikovaném množství.

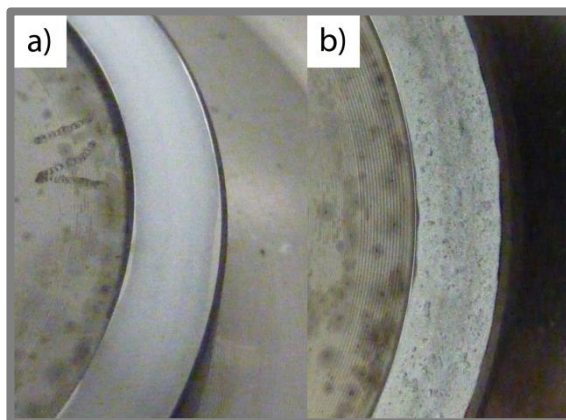


**Obr. 5-24** Adhezní křivky kompozice vody, 5 % mastku L a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film)

Kompozice obsahující 1 % grafitu naopak nezajistila hodnotu součinitele adheze vyšší než 0,15 (obr. 5-25). Pouze v druhé půlce testu při aplikaci 20 a 50  $\mu\text{l}$  bylo dosaženo hodnot 0,15. Během prvních několika sekund došlo k rychlému nárůstu, následnému poklesu a stabilizaci součinitele adheze. Tato oblast byla velice krátká a z hlediska vyhodnocení nevýznamná. Po aplikaci a vyschnutí kompozice s grafitem byly pozorovány shluky grafitových částic (obr. 5-26b). V případě disulfidu molybdenu tyto shluky nenastaly a kompozice vypadala homogenně rozložená (obr. 5-26a). Také je třeba zmínit, že aplikované množství 50  $\mu\text{l}$  pokrývalo celou vrchní plochu disku. Proto přibližně 2/3 aplikované kompozice byly naneseny mimo dráhu kuličky. Hlavním závěrem těchto testovaných kompozic je, že grafit je účinnější mazivo než disulfid molybdenu.



**Obr. 5-25** Adhezní křivky kompozice vody, 5 % mastku L a 1 % grafitu (suchý film)

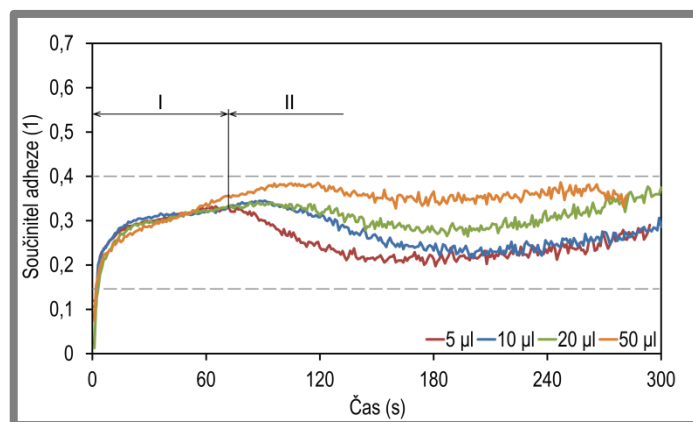


**Obr. 5-26** Nanesené vrstvy 50  $\mu\text{l}$  5 % mastku L  
a a) 1 % disulfid molybdenu, b) 1 % grafit

Následující testy srovnávaly vliv množství, velikosti a tvrdosti částic v kompozici s mazivem. Množství částic bylo testováno ve složeních 5 % a 15 %. Velikost částic byla otestována mastkem L a mastkem S. Jako tvrdší částice byl použit oxid zinku.

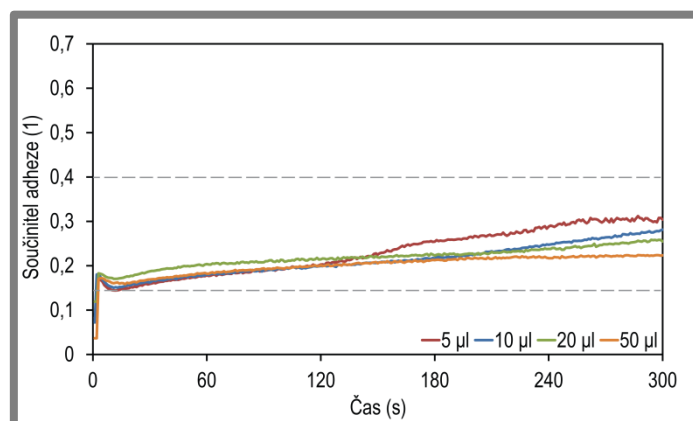
Zvýšením množství mastku L z 5 % (obr. 5-24) na 15 % (obr. 5-27) došlo k vyššímu počátečnímu nárůstu součinitele adheze na hodnotu 0,3 (oproti 0,2 u kompozice s 5 % mastku L). Velikost a rychlost počátečního nárůstu nebyla ovlivněna aplikovaným množstvím (oblast I). V oblasti II již aplikované množství ovlivňovalo velikost součinitele adheze. Nižší množství způsobilo pokles až k hodnotám 0,2. Množství 50  $\mu\text{l}$  způsobilo nárůst součinitele adheze na hodnotu

0,35 a v průběhu testu se tato hodnota neměnila. Na rozdíl od složení s 5 % mastku L adhezní křivka v oblasti II značně kolísá.



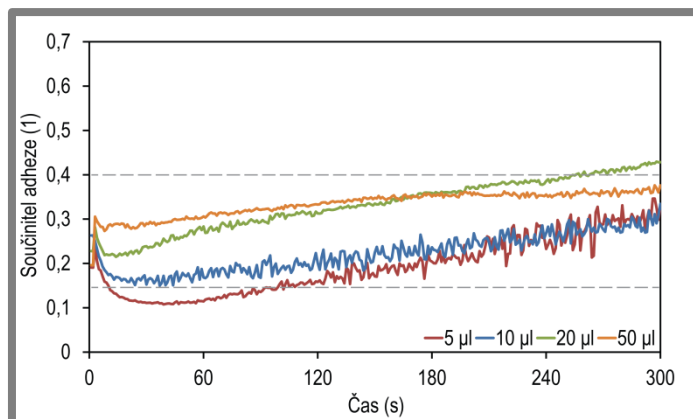
**Obr. 5-27** Adhezní křivky kompozice vody, 15 % mastku L a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film)

Zmenšením velikosti částic pro modifikaci tření (obr. 5-28) dojde k odstranění oblasti I. Prvotní nárůst součinitele adheze se zastaví na hodnotě 0,17 pro všechny testované množství. Během celého testu dochází k pomalému nárůstu adheze. Na konci měření je součinitel adheze nejvyšší pro nejmenší aplikované množství. Hlavní zlom nastane v době cca 130 s, kde křivka pro 5 μl začne oproti ostatním aplikovaným množstvím více narůstat. Naopak křivka pro 50 μl v průběhu celého testu výrazně nemění svůj průběh.



**Obr. 5-28** Adhezní křivky kompozice vody, 15 % mastku S a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film)

Poslední testovaná kompozice obsahovala 15 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (obr. 5-29). Po spuštění testu všechna aplikovaná množství začínala z hodnot součinitele adheze cca 0,25. Nicméně velikost aplikovaného množství silně ovlivnila průběh adhezní křivky. Nejmenší množství 5 μl se po několika sekundách dostalo pod hodnoty 0,15. Ostatní testovaná množství se pod tuto hranici nepropadla. Ve všech případech adhezní křivky dodržovaly stoupající trend. Pro množství 5 μl a 10 μl je patrný rozptyl hodnot součinitele adheze v průběhu testu.



**Obr. 5-29** Adhezni křivky kompozice vody, 15 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film)

## 5.4 Čtyřsložkové kompozice

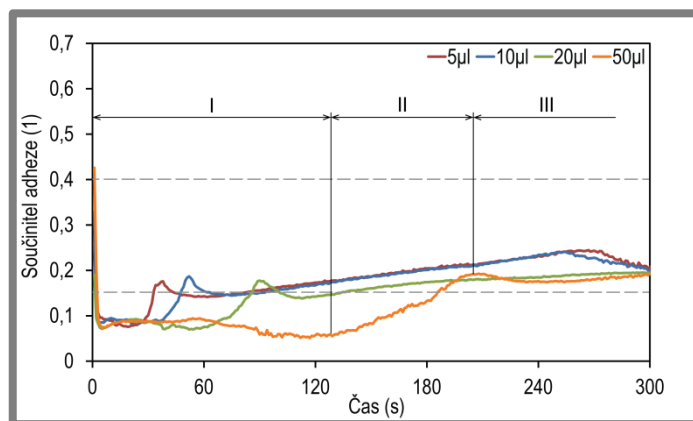
Na základě patentů [28, 30, 31] byla vybrána hlavní testovaná kompozice obsahující všechny složky. V zmíněných patentech se často vyskytuje kompozice složená z 6–10 % zahušťovadla, 5 % částic pro modifikaci tření a 5 % maziva. Tato kompozice je označována jako HPF. Bylo zvoleno 7,5 % zahušťovadla (bentonit) a všechny kombinace částic pro modifikaci tření (mastku L a oxidu zinku) s mazivem (disulfid molybdenu a grafit).

5.4

### 5.4.1 Malé aplikované množství, mokřý film

Kompozice s mastkem a disulfidem molybdenu se ihned po aplikaci dostala pod součinitel adheze 0,1 ve všech aplikovaných množstvích (obr. 5-30, oblast I). Délka tohoto propadu se zvětšovala s aplikovaným množstvím. Po ukončení této oblasti nízké adheze došlo k nárůstu nad hodnoty 0,15. Zbytek testu docházelo k pomalému růstu součinitele adheze. Pro aplikovaná množství 5 a 10 μl je ke konci adhezni křivky patrný pokles, který se neobjevil u 20 a 50 μl. Na obr. 5-31a je snímek kompozice složené z 5 % disulfidu molybdenu. Na snímku je patrná malá oblast

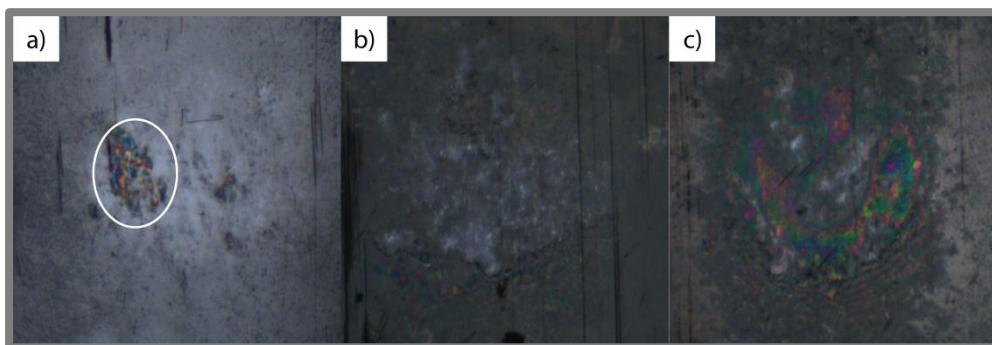
5.4.1



**Obr. 5-30** Adhezni křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu (mokřý film)

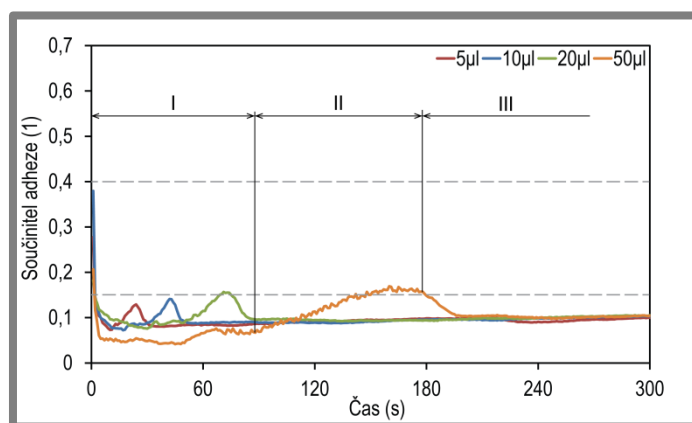


porušení filmu. Takovéto porušení filmu se objevilo pouze zřídka. Na obr. 5-31b a 5-31c je kompozice složená ze 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu. Lze pozorovat, že může dojít k úplnému oddělení kontaktních těles vrstvou složenou z disulfidu molybdenu (snímek b), případně částečnému oddělení (snímek c). Oba tyto snímky reprezentují oblast I na obr. 5-30, kde dominantním prvkem je mazivo.



**Obr. 5-31** Snímky kontaktu zaplaveného vodou a a) 5 % disulfidu molybdenu, b) a c) 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu

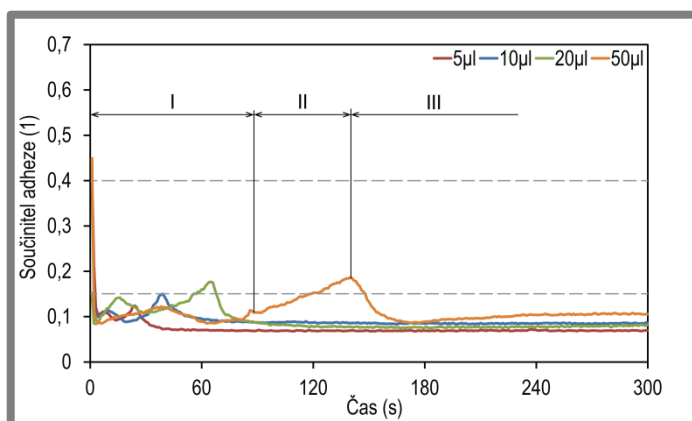
Záměnou disulfidu molybdenu za grafit dojde ke zkrácení oblasti nízkého součinitele adheze po aplikaci (obr. 5-32, oblast I). Část nárůstu adheze (II) ovšem nepokračuje po celou dobu testu, ale dojde k opětovnému propadu součinitele adheze na hodnotu 0,1 (oblast III) nezávisle na aplikovaném množství. Takto nízké hodnoty trvaly až do ukončení testu. Pouze v případě aplikace 20 a 50  $\mu\text{l}$  došlo ke krátkému překročení součinitele adheze 0,15. Nejčastější hodnota se pohybovala okolo 0,1.



**Obr. 5-32** Adhezí křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % grafitu (mokrý film)

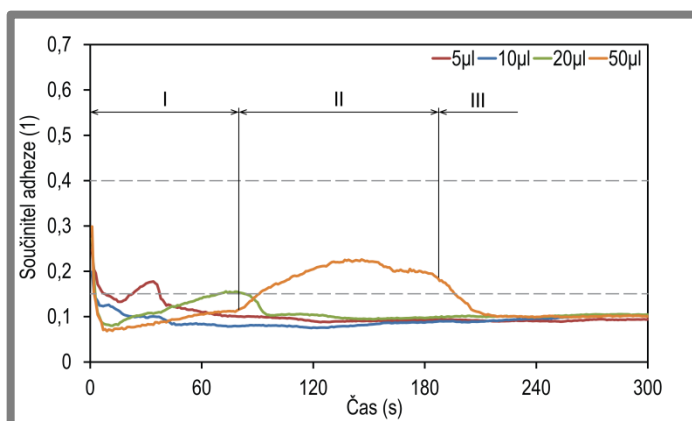
Kompozice se zahušťovadlem, 5 % oxidu zinku a 5 % disulfidu molybdenu vykazovala podobné chování jako v případě mastku L a grafitu (obr. 5-33). Oblasti označené jako I, II a III probíhají takřka identicky. Hlavní rozdíl je ve zkrácení oblasti nárůstu adheze (II). Patrný rozdíl lze také pozorovat ve velikosti součinitele adheze. Na konci testu lze vidět rozdíl mezi nižším součinitelem adheze při aplikaci 5  $\mu\text{l}$  a vyšším součinitelem adheze při 50  $\mu\text{l}$ .





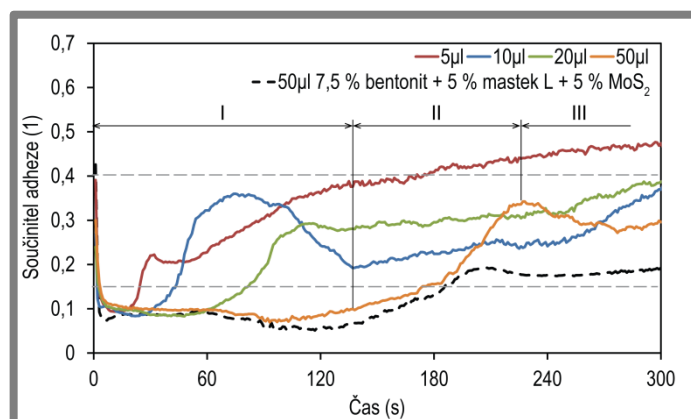
**Obr. 5-33** Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 5 % disulfidu molybdenu (mokrý film)

Poslední z hlavních testovaných kompozic složená z bentonitu, oxidu zinku a grafitu vykazovala podobný průběh adhezních křivek jako v případě použití disulfidu molybdenu. První část adhezní křivky (obr 5-34, oblast I) opět dosahuje součinitele adheze nižšího než 0,1. Poté oblast nárůstu (II), která v případě aplikace 50 μl přesáhne součinitel adheze 0,15 po delší dobu. Ke konci testu se znovu objeví oblast poklesu adheze (III). Velikost součinitele adheze se v této oblasti výrazně neliší pro rozdílné aplikované množství.



**Obr. 5-34** Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 5 % grafitu (mokrý film)

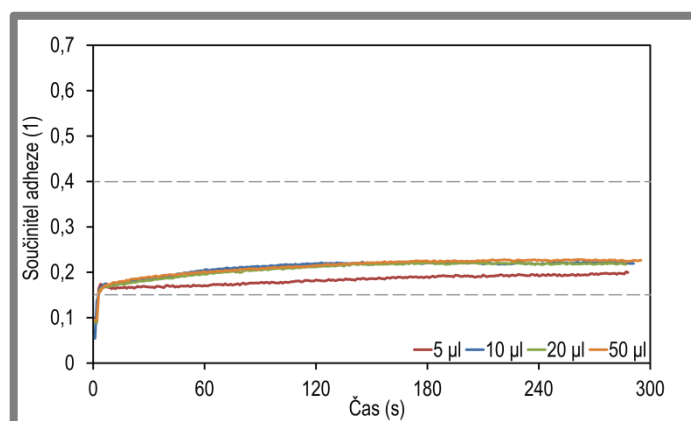
Pro dosažení vyššího součinitele adheze byla vytvořena kompozice složená ze 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu. Snížení obsahu maziva by mělo zvýšit efektivitu částic pro modifikaci tření. Adhezní křivky této kompozice (obr. 5-35) ovšem dosahují stejného poklesu součinitele adheze jako v případě kompozice s 5 % disulfidu molybdenu (oblast I, hodnoty okolo 0,1 pro všechny aplikované množství). Délka tohoto propadu nebyla ovlivněna sníženým množstvím maziva. Hlavní odlišností jsou oblasti II a III. Nárůst součinitele adheze v oblasti II dosahuje vyšších hodnot při nižším množství maziva. Nižší aplikované množství zkracuje oblast nízké adheze (I), urychluje nárůst a zkracuje oblast II. Při aplikaci 5 μl dojde ke zkrácení oblasti I a II na 30 s. Velikost součinitele adheze v průběhu testu navíc překročí hodnotu 0,4. Snížením množství maziva z 5 % na 2 % tedy dojde k nejvýraznějším rozdílům v oblasti nárůstu adheze pro malá aplikovaná množství.



Obr. 5-35 Adhezni křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu (mokrý film)

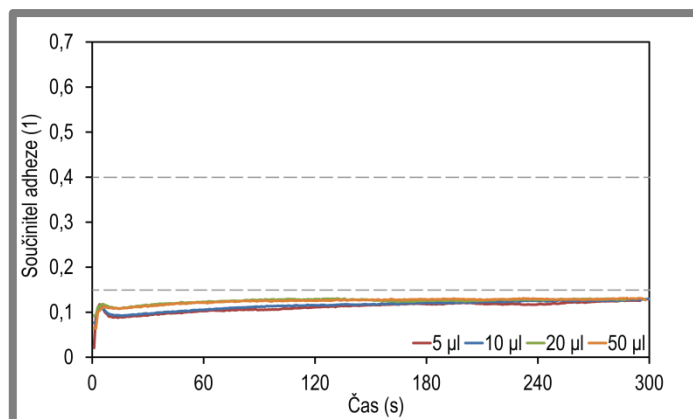
#### 5.4.2 Malé aplikované množství, suchý film

Suchý film byl otestován pro stejné kompozice jako v případě mokrého filmu. První testovaná kompozice složená z 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu po vyschnutí a spuštění testu dosáhla součinitele adheze 0,17 (obr. 5-36). Adhezni křivka pro aplikované množství 5 μl na konci testu vystoupala na hodnotu 0,2. Ostatní množství dosahovaly podobných hodnot součinitele adheze okolo 0,22.



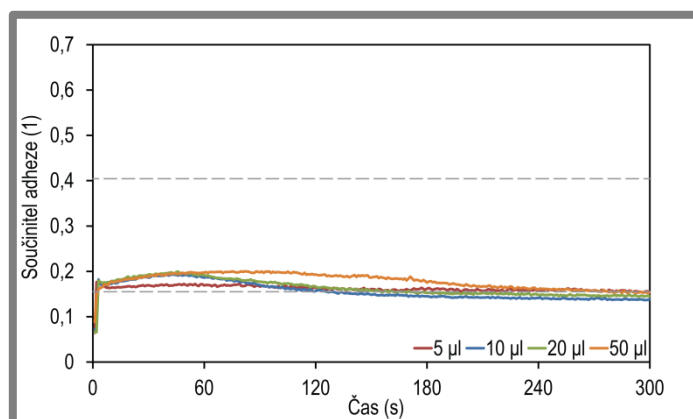
Obr. 5-36 Adhezni křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu (suchý film)

Druhá testovaná kompozice s 5 % grafitu opět dosahovala nižších hodnot součinitele adheze, než kompozice s disulfidem molybdenu (obr. 5-37). Se zvýšením aplikovaného množství jsou hodnoty nepatrně vyšší. Na konci testu došlo k přiblížení hodnot součinitele adheze pro všechny testované množství. Během všech testů nedošlo k překročení hranice 0,15. Hodnoty se pohybovaly mezi 0,1 a 0,15. Trend adhezni křivek ve druhé polovině testu byl lineární a dosahoval konstantních hodnot.



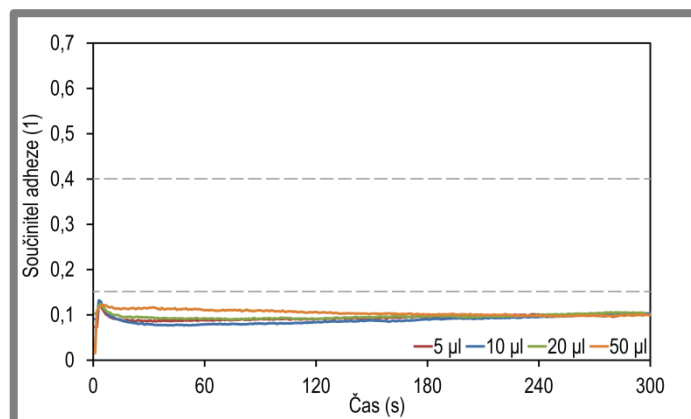
**Obr. 5-37** Adhezční křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % grafitu (suchý film)

Při využití oxidu zinku jako částic pro modifikaci tření dosáhl součinitel adheze nižších hodnot než v případě mastku L pro obě testovaná maziva. Použitím disulfidu molybdenu (obr. 5-38) se součinitel adheze pro všechny testovaná množství zpočátku držel na hodnotách 0,16–0,2, ovšem ke konci testu se všechny křivky blížily k hodnotě 0,15. Nejmenšího rozptylu hodnot v průběhu testu zajistila aplikace 5 µl.



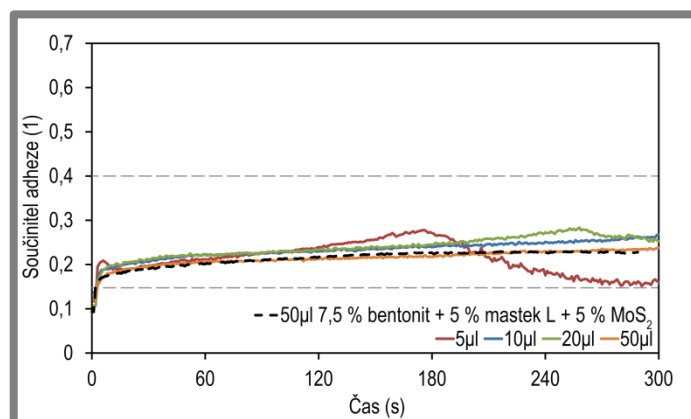
**Obr. 5-38** Adhezční křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxid zinku a 5 % disulfidu molybdenu (suchý film)

Záměnou maziva za grafit došlo stejně jako v případě kompozic s mastkem k snížení součinitele adheze pod hodnoty 0,15 (obr. 5-39). Ani jedno aplikované množství nedosáhlo vyšší hodnoty součinitele adheze než 0,12. V první půlce testu dosahovalo nejvyšších hodnot součinitele adheze aplikované množství 50 µl. Na konci testu již byly rozdíly mezi aplikovaným množstvím zanedbatelné.



**Obr. 5-39** Adhezni křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxid zinku a 5 % grafitu (suchý film)

Nejzajímavější kompozice s 5 % mastku L byla opět otestována s nižším množstvím maziva v kompozici. Stejně jako v případě mokrého filmu bylo zvoleno 2 % disulfidu molybdenu. Cílem bylo zvýšit hodnoty součinitele adheze nad hranici 0,2. V případě mokrého filmu nebyl patrný rozdíl v prvotním poklesu součinitele adheze při zmenšení množství maziva. Tento pokles se ovšem u suchých filmů neobjevuje. Porovnáním aplikace 50 µl kompozice s 5 % a 2 % disulfidu molybdenu nedojde k výrazným rozdílům (obráz. 5-40). Ovšem pro aplikované množství 5 µl nastane v čase 180 s pomalý přechod do nižších hodnot součinitele adheze. Tento pokles se ke konci testu blíží k hodnotám 0,15. Tato změna chování trakční křivky je patrná i pro 10 µl v čase cca 260 s.



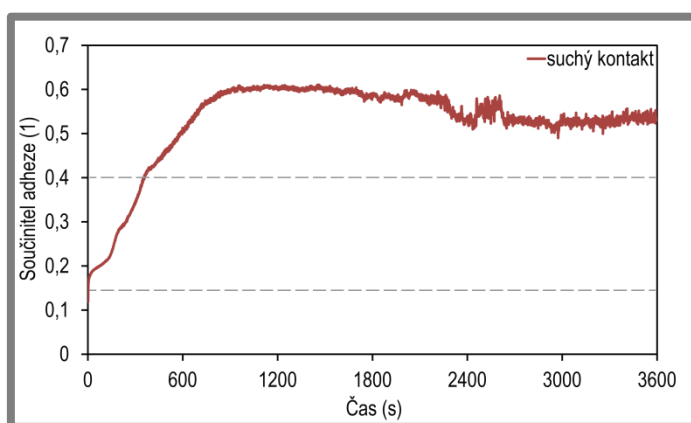
**Obr. 5-40** Adhezni křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxid zinku a 2 % disulfidu molybdenu (suchý film)

## 5.5 Testy opotřebení

Dlouhodobé chování kompozic bylo hodnoceno na testech opotřebení. Každý test opotřebení trval 60 minut za stejných podmínek jako předchozí testy. Hlavní změna oproti předchozím testům je použití materiálů vzorků, které se svými vlastnostmi blíží reálným materiálům kola a kolejnice. Pro testování byly zvoleny kompozice se 7,5 % bentonitu, 5 % částic pro modifikaci tření (mastek L a oxid zinku) a 2 %

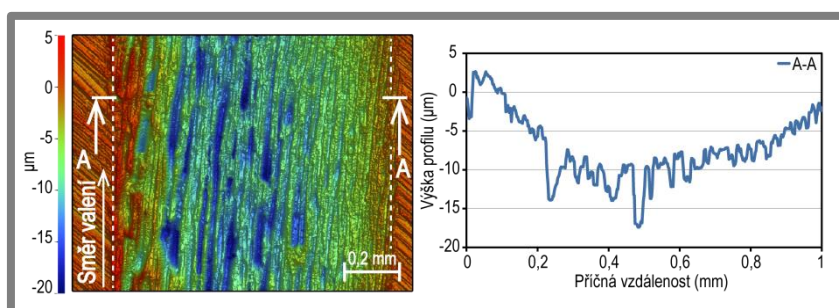
disulfidu molybdenu. Aplikované množství bylo vždy 20  $\mu\text{l}$ . Jako referenční měření byl zvolen test suchého kontaktu, kdy očištěné vzorky prošly stejným 60 minutovým testem opotřebení. Bližší postup průběhu testu je popsán v kapitole 4.6.

Součinitel adheze pro suchý kontakt dosáhl maximálních hodnot 0,6 (obr. 5-41). Prvních 12 minut testu docházelo k pomalému nárůstu, až byla dosažena maximální hodnota součinitele adheze. Přibližně v polovině testu došlo k malému poklesu součinitele adheze a také k rozkmitání mezi hodnotami 0,49–0,55.



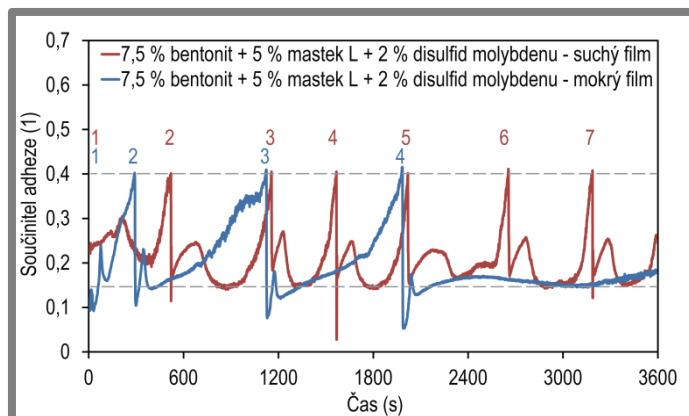
Obr. 5-41 Adhezní křivka suchého kontaktu

Z analýzy povrchu po ukončení testu lze vidět, že šířka poškozené oblasti se blíží 1 mm (obr. 5-42). V drážce jsou patrné rýhy, které zasahují hluboko do materiálu. Nejvyšší hloubka drážky se pohybovala v rozmezí  $-10$  až  $-18$   $\mu\text{m}$ . Hmotnost ubraného materiálu, způsobená opotřebením, byla 6,2 mg.



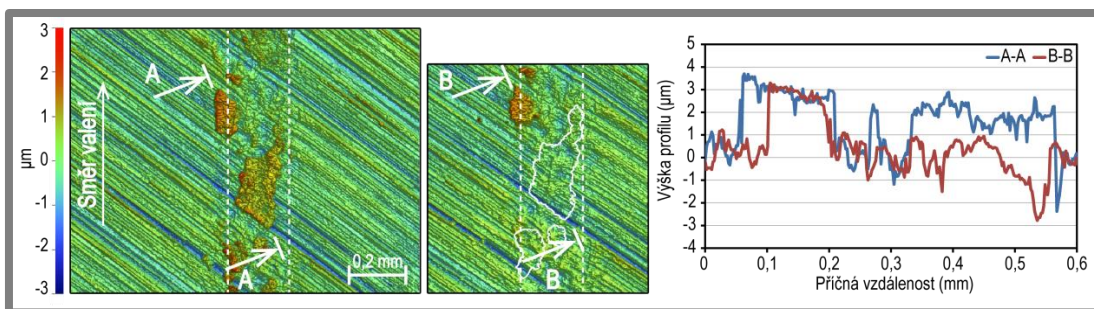
Obr. 5-42 Analýza povrchu disku po testu suchého kontaktu

První testovaná kompozice obsahující 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu udržela součinitel adheze nad hodnotou 0,15 (obr. 5-43) při aplikaci suchého i mokrého filmu. Pod hranici 0,15 se adhezní křivka dostala na krátkou dobu pouze po aplikaci kompozice. Interval mezi jednotlivými aplikacemi pro suchý film byl vždy přibližně stejný. Ovšem pro mokrý film se interval mezi aplikacemi prodlužoval. Při třetí aplikaci již nebylo třeba znovu nanášet modifikátor tření až do konce testu a součinitel adheze se držel nad hodnotou cca 0,2.



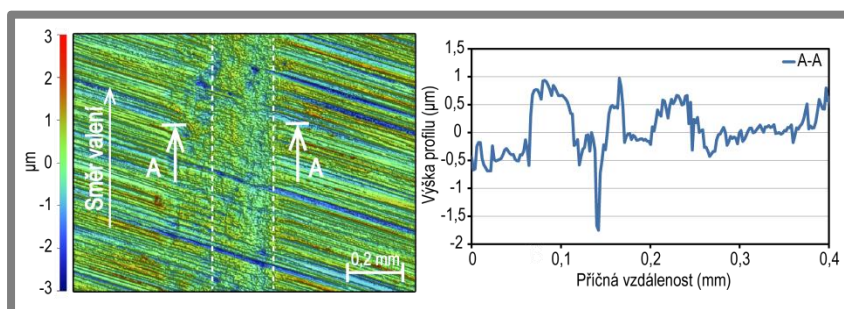
**Obr. 5-43** Adhezní křivka kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu

Na povrchu disku byla po konci testu suchého filmu pozorována přilnutá vrstva. Tuto vrstvu tvořily na několika místech velké stopy nahromaděných částic mastku (obr. 5-44). Výška těchto stop byla 2–3  $\mu\text{m}$ . Usazený materiál byl mechanicky odstraněn a bylo zjištěno, že povrch pod ním nebyl znatelně poškozen. Na žádném z měřených míst nebyly zaznamenány rýhy jako v případě suchého kontaktu, nicméně objevily se občasné důlky s hloubkou maximálně 2  $\mu\text{m}$ . Změna hmotnosti disku po testu byla 1,8 mg.



**Obr. 5-44** Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu (suchý film)

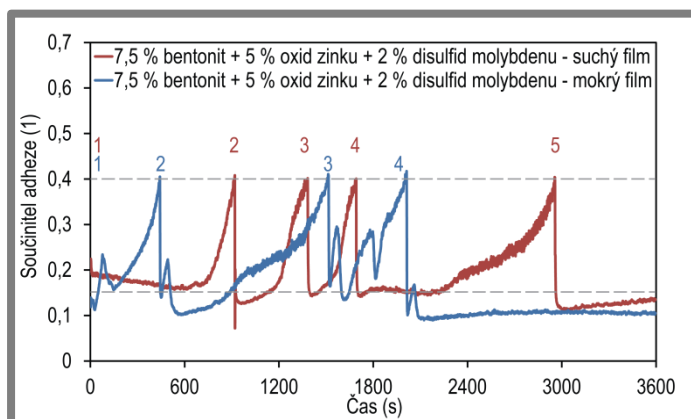
Analýza disku po testu s mokrým filmem také ukázala přilnutou vrstvu částic mastku na povrchu (obr. 5-45). Povrch disku pod filmem taktéž nebyl výrazně poškozen a nevyskytly se žádné rýhy. Občasně se vyskytující důlky dosahovaly maximálních hloubek okolo 3  $\mu\text{m}$ . Hmotnost odebraného materiálu byla 2,1 mg.



**Obr. 5-45** Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu (mokrý film)

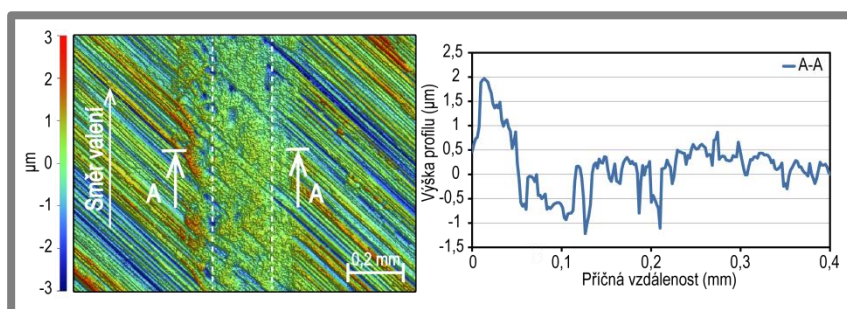


Test opotřebení s kompozicí složené z oxidu zinku a disulfidu molybdenu dosahovala v průběhu celého testu nižšího a stabilnějšího průběhu součinitele adheze (obr. 5-46) než v případě mastku a disulfidu molybdenu. Mokrý film dosahoval při druhé a třetí aplikaci velmi malé výdrže. První čtyři nanesené filmy dosahovaly hodnot součinitele adheze vyšších než 0,15. Při poslední (páté) aplikaci již adheze spadla na hodnotu 0,1 a na konci testu se přiblížila k 0,15. Aplikace mokrého filmu při druhé a čtvrté aplikaci vedla na nízkou hodnotu součinitele adheze. Poslední aplikace v čase přibližně 2000 s dosáhla nízké hodnoty součinitele adheze trvajících až do konce testu.



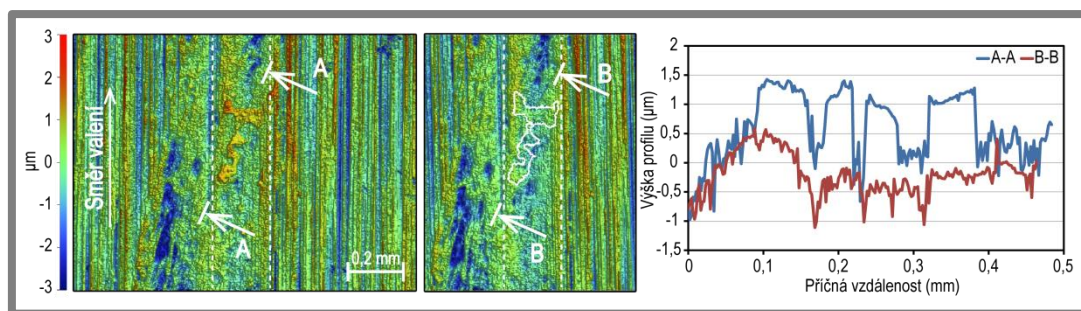
Obr. 5-46 Adhezni křivka kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 2 % disulfidu molybdenu

Povrch disku byl u suchého filmu stejně jako v případě použití mastku pokryt filmem z částic oxidu zinku (obr. 5-47). Tloušťka přilnutého filmu se pohybovala mezi 1–2  $\mu\text{m}$ . Povrch pod tímto filmem nebyl výrazně poškozen. Maximální zjištěná hloubka důlků, které se na několika místech vyskytly, byla cca 2,5  $\mu\text{m}$ . Množství materiálu odebraného opotřebením byla 0,8 mg.



Obr. 5-47 Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 2 % disulfidu molybdenu (suchý film)

Mokrý film také vytvořil tenkou vrstvu na povrchu disku. Velikost změřené přilnuté vrstvy byla 1,5  $\mu\text{m}$  (obr. 5-48). Po odstranění vrstvy nebylo patrné závažné poškození disku. Nicméně na sledovaných místech se místy objevily hluboké důlky a rýhy. Velikost těchto poškození dosahovala hloubky 2–3  $\mu\text{m}$  a jejich výskyt byl četnější než v případě suchého filmu. Přesto byla hmotnost opotřebeného materiálu pouze 1 mg.



**Obr. 5-48** Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 2 % disulfidu molybdenu (mokrý film)

Oba modifikátory tření dokázaly redukovat součinitele adheze oproti suchému kontaktu na více než polovinu. K propadům na nízkou hodnotu součinitele adheze docházelo zejména v prvních sekundách po aplikaci. Modifikátory tření aplikované mokrým filmem dosáhly při čtvrté aplikaci velmi dlouhé výdrže. Použitím modifikátoru tření bylo výrazně redukováno opotřebení. Na konci každého testu s modifikátorem tření byla na povrchu disku patrná vrstva složená z částic pro modifikaci tření.



## 6 DISKUZE

## 6

### 6.1

### 6.1 Samostatné komponenty

Testy samostatných komponent byly provedeny aplikací 0,05 g látky roznesené rovnoměrně po povrchu disku. Suchý kontakt dosahoval součinitele adheze 0,6 (obr. 5-1, str. 40). Tato hodnota zapadá přibližně doprostřed rozmezí hodnot suchého kontaktu pro zařízení zmíněné v [15] (obr. 2-12, str. 23). Při porovnání s publikací [38] je součinitel adheze menší, ovšem ve zmíněné práci je použit materiál podobný materiálu kolejnice a testování je provedeno za rychlosti 1500 mm/s.

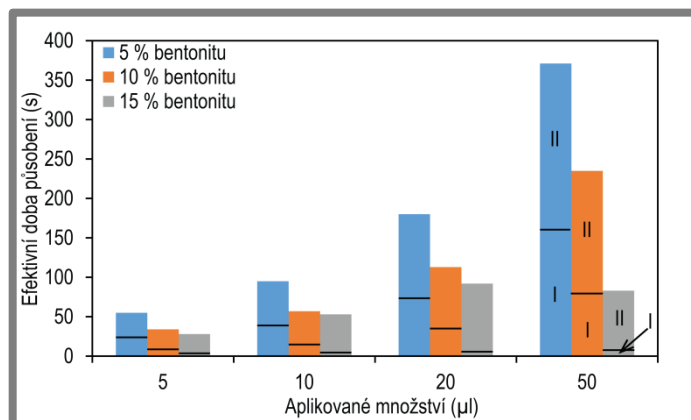
Testované částice pro modifikaci tření dokázaly snížit součinitel adheze oproti suchým podmínkám. Oxid zinku snížil součinitel adheze na hodnotu 0,5 a konstantně ji udržoval v průběhu celého testu. Oproti ostatním testovaným částicím dosahoval vyšších hodnot součinitele adheze zejména proto, že vyšší tvrdost a smyková pevnost umožňuje lépe přenášet síly mezi kontaktními tělesy. Tyto vlastnosti společně s vhodnou velikostí částic lze využít při odstranění vrstvy kontaminantů z povrchu kolejnice [13, 14, 16], avšak je potřeba brát v potaz zvýšené opotřebení kontaktních povrchů. Částice mastku a bentonitu díky své nižší smykové pevnosti a tvrdosti dosahovaly nižších hodnot součinitele adheze než oxid zinku. Jelikož je šířka kontaktní oblasti přibližně 0,2 mm (vypočítáno z Hertzovy kontaktní teorie) výrazně větší než velikost částic lze předpokládat, že velká část částic se do kontaktu dostane. Rozdílné chování mastků s jinými velikostmi částic lze vysvětlit tím, že menší částice se rychleji nadrtí na jemný prášek, zatímco velké částice potřebují více cyklů. Po vytvoření dostatečně jemného prášku dojde ke kontaktu nerovností povrchu a smísení s částicemi opotřebení. Tato fáze je patrná na adhezních křivkách poklesem a velkým rozpětím součinitele adheze. V případě mastku L k tomuto jevu po celou dobu testu nedošlo. Lze tedy předpokládat, že po celou dobu testu docházelo k drčení velkých částic mastku L. Větší velikost částic tedy zajišťuje vyšší součinitel adheze. Ke stejnému závěru došel Wang [39], který použil částice písku o velikosti 500  $\mu\text{m}$  a 1300  $\mu\text{m}$ . Arias-Cuevas a kol. [40] také pozorovali stejný trend s částicemi písku o velikostech 60  $\mu\text{m}$  až 1,2 mm. Ovšem opačný trend naměřili Cao a kol. [41] s částicemi hliníku. Tyto rozdílné závěry mohou být způsobeny odlišnou velikostí a tvarem kontaktní oblasti. Zmíněné publikace navíc testují částice v kombinaci s vodou (Wang [39] a Cao [41]) nebo listím (Arias-Cuevas [40]). Z testovaných maziv je efektivnější grafit, který dosahoval součinitele adheze přibližně 0,05. Disulfid molybdenu dosahoval o něco vyšší hodnoty adheze cca 0,1. Prokluz mezi kontaktními tělesy neměl vliv na změnu chování maziv v průběhu testu. Podobné chování bylo naměřeno autory Hou a kol. [9].

Aplikace vody měla za následek pokles součinitele adheze na hodnotu 0,3 a postupný nárůst do hodnot suchého kontaktu (obr. 5-3, str. 41). Součinitel adheze pro kontakt zaplavený vodou je velice podobný hodnotám zmíněným v práci [15], ve které jsou porovnány aplikace vody pro různé typy experimentálních zařízení. Tento výsledek naznačuje mezní režim mazání, který byl uvažován při volbě parametrů experimentu. Aplikace menšího množství měla pouze malý vliv na pokles adheze.

## 6.2 Dvousložkové kompozice

Z dvousložkových kompozic byly testovány složení vody s bentonitem a vody s částicemi pro modifikaci tření. Aplikace probíhala s větším (1 ml) a menším (5–50  $\mu$ l) množstvím. Všechny testy probíhaly aplikací mokrého filmu. Větší aplikované množství bentonitu v rozmezí 5–12,5 % dosáhlo v průběhu testu stabilní hodnoty součinitele adheze přibližně 0,2. V tomto případě není velikost adheze zásadně ovlivněna reologickými vlastnostmi kompozice. Tato hodnota adheze je vhodná pro trakci a brzdění tramvajového vozidla. Zároveň se ukazuje, že přehlcení kontaktu vysokou aplikovanou dávkou v případě vody a bentonitu nevede na kriticky nízký součinitel adheze. Tato pozitivní vlastnost není sledována u modifikátorů tření na olejové bázi, které vykazují vysokou citlivost na aplikované množství [42, 43]. Aplikace většího množství olejového modifikátoru tření může mít za následek např. nedobrzdní vozidla ve stanici. Při testování kompozice s 15 % bentonitu docházelo k pomalému přechodu na suchou hodnotu adheze. Tento jev je způsoben vytlačením aplikované dávky mimo dráhu kuličky, zabráněním opakovanému zaplavení kontaktu a postupnému odstranění vrstvy prokluzem mezi kontaktními povrchy. Neschopnost kompozice vrátit se do kontaktu je způsobena vysokou viskozitou.

Menší aplikované množství kompozice z vody a bentonitu ukázalo, že velikost aplikovaného množství pouze prodlužuje efektivní dobu působení kompozice (obr. 6-1). Zvýšením aplikované dávky nedojde ke změně průběhu adhezni křivky. Minimální hodnoty součinitele adheze se pro všechna aplikovaná množství a složení pohybovaly vždy okolo 0,15. Pro nižší množství bentonitu (5 % a 10 %) adhezni křivka nejprve klesá. Po dosažení minimální hodnoty adheze dojde k nárůstu až na hodnoty součinitele adheze suchého kontaktu. Oblast poklesu je způsobena pomalým vysycháním kompozice, kdy se mezi kontaktními tělesy utváří vrstva s nízkou smykovou pevností. Absence vody po vyschnutí způsobí neschopnost filmu udržet částice bentonitu v kontaktu a vlivem prokluzu je film pomalu odstraňován. Vyšší množství bentonitu zcela potlačuje oblast poklesu adheze, což je způsobeno vyšší viskozitou, menším obsahem vody a tedy rychlejším vytlačením a vyschnutím kompozice. Poměr mezi oblastí poklesu (I) a nárůstu (II) součinitele adheze není ovlivněn vyšším aplikovaným množstvím (viz obr. 6-1).



Obr. 6-1 Efektivní doby působení vody s bentonitem

Součinitel adheze při aplikaci většího množství kompozice vody a mastku L byl výrazně závislý na množství obsaženého mastku (viz obr. 5-6, str. 43). S rostoucím

množstvím mastku L klesal součinitel adheze. Pod hodnotu součinitele adheze 0,15 se dostala kompozice obsahující více než 15 % mastku L. Takto nízké hodnoty adheze je dosaženo oddělením povrchů vrstvou mastku s nízkou smykovou pevností. Díky úplnému zaplavení kontaktu je tato vrstva neustále zásobována částicemi mastku a nedojde k jejímu porušení. Množství mastku nižší než 10 % naopak neumožňuje separaci povrchů vrstvou mastku a součinitele adheze dosahuje hodnot suchého kontaktu. Vytvořená vrstva byla sledována na optickém tribometru. Beagley ve své práci [8] zjistil, že směs pevných částic s vodou může dosahovat velmi nízkých hodnot součinitele adheze. Zároveň došel k závěru, že velikost adheze je závislá na viskozitě směsi, množství částic a jejich smykové pevnosti.

Aplikace menších množství vody a mastku rozdělila adhezní křivku na tři oblasti. První oblast zajistila konstantní součinitel adheze v hodnotách 0,3–0,4 pro 5 % mastku nezávisle na velikosti jeho částic. Nižších hodnot bylo dosaženo zvýšením množství mastku. V druhé oblasti křivky došlo k rapidnímu propadu součinitele adheze na hodnoty blíží se 0,05, avšak pro složení s 5 % a 10 % byla délka propadu oproti celému průběhu adhezní křivky nevýznamná. Délka propadu se navíc prodlužovala s vyšším obsahem mastku a nebyla ovlivněna aplikovaným množstvím. Pro 15 % mastku L trvala oblast stabilní hodnoty adheze a oblast propadu adheze stejně dlouho. Takovéto chování je už nevhodné pro modifikátory tření. Třetí část křivky je nárůst na součinitel adheze suchého kontaktu. Takovéto rozdělení na tři oblasti bylo pozorováno u kompozice složené z vody a částic  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  v práci Beaglyho a Pritcharda [44]. Propad adheze v případě částic  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ovšem nebyl tak výrazný jako v případě mastku. V obou případech tyto propady adheze způsobuje vysoce viskózní pasta mezi kontaktními povrchy.

Oxid zinku v menším aplikovaném množství nedosáhl součinitele adheze nižšího než 0,3 (pro 5  $\mu\text{l}$ ). Vyšší aplikované množství vedlo na vyšší součinitel adheze (0,5 pro 50  $\mu\text{l}$ ). Nedošlo tedy k vytvoření viskózní pasty, která by byla schopná redukovat součinitel adheze na velmi nízké hodnoty.

### 6.3 Tříslóžkové kompozice

Mokrý film vody, bentonitu a mastku dosáhl velmi nízké hodnoty součinitele adheze pro všechny testované složení a aplikované množství. Aplikace 1 ml kompozice s 5 % a 10 % zahušťovadla (bentonit) vždy vedla na adhezi menší než 0,15 nezávisle na množství mastku. Zvýšením množství bentonitu na 15 % došlo opět k vytlačení kompozice a pomalému odstraňování filmu z povrchu disku. Pro větší aplikované množství má přidání mastku negativní vliv na průběh adhezní křivky.

Menší aplikovaná množství mokrého filmu také dosahovala poklesu adheze pod hodnoty 0,15 pro všechny testované složení. Přidáním bentonitu je navíc potlačena stabilní část adhezní křivky, které bylo dosaženo s vodou a mastkem. Porovnáním tříslóžkových kompozic s dvouslóžkovými je patrné, že dominantní vliv na průběh adhezní křivky má zahušťovadlo (obr. 5-18, str. 49). Všechny tyto složení jsou nevhodné pro modifikátory tření.

Naopak využitím oxidu zinku jako částic pro modifikaci tření bylo v menším dávkovaném množství dosaženo dobrých průběhů adhezních křivek. Tyto průběhy byly takřka identické s adhezními křivkami vody a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  změřených v práci Beaglyho a Pritcharda [44]. Samotný zinek s vodou neměl dostatečnou schopnost snížit součinitel adheze, ovšem přidáním bentonitu došlo k dosažení hodnot

v rozmezí 0,15–0,4. Při složení 5 % bentonitu a 5 % oxidu zinku byla pozorována stabilní část součinitele adheze stejně jako v případě masku s vodou. Následný pokles součinitele adheze se držel nad hodnotou 0,15 pro aplikaci 50  $\mu\text{l}$ . Vhodně zvoleným množstvím zahušťovadla a oxidu zinku tedy lze dosáhnout dobrých vlastností modifikátoru tření.

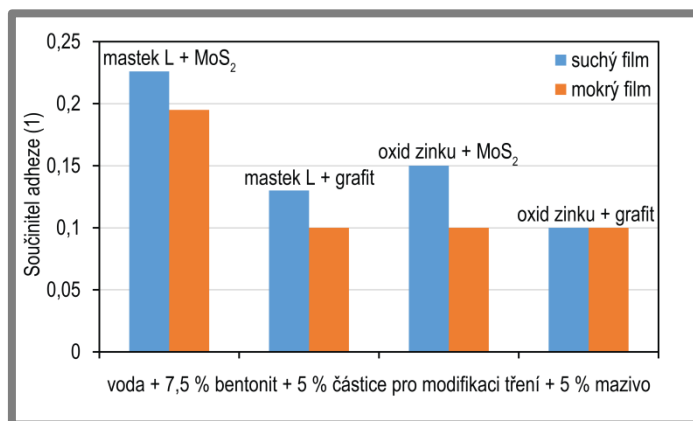
Testované kompozice s částicemi pro modifikaci tření a disulfidem molybdenu dosahovaly při aplikaci mokrého filmu součinitele adheze nižšího než 0,15. Pouze kompozice složená z 15 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu dokázala udržet součinitel adheze pro všechna aplikovaná množství nad hodnotou 0,15. Naopak testování suchého filmu ukázalo, že grafit snižuje součinitel adheze do nepřijatelných hodnot.

Na základě výše popsaných výsledků je zřejmé, že bentonit s vodou dokáže zajistit optimální součinitel adheze. Ovšem přidání nevhodně zvoleného materiálu částic pro modifikaci tření může vést ke zhoršení vlastností kompozice. V případě aplikace mokrého filmu a s ohledem na zvolené metody a zařízení tedy lze říci, že první část hypotézy, zmíněné v kapitole 3.2, byla vyvrácena. Tedy částice pro modifikaci tření (zejména mastek) nejsou nezbytné pro dosažení dostatečné adheze. V určitých kompozicích mají dokonce negativní vliv na součinitel adheze. Vzhledem k průběhu adhezních křivek mokrého filmu pro testované kompozice č. 13–21 (voda, bentonit a mastek L), 22–25 (voda, bentonit a oxid zinku) a 1–4 (voda bentonit) se ukázalo, že dominantní složkou tříslůžkových kompozic je zahušťovadlo, a tedy i druhou část hypotézy lze vyvrátit.

## 6.4 Čtyřsložkové kompozice

Kompozice složené ze čtyř složek byly testovány vždy při složení 7,5 % bentonit, 5 % částice pro modifikaci tření a na základě patentů [28, 30, 31] bylo zvoleno 5 % maziva. Testování mokrého filmu ukázalo, že nezávisle na použití částic pro modifikaci tření a maziva bylo vždy dosaženo velmi nízkých hodnot součinitele adheze. Pouze v případě masku L a disulfidu molybdenu došlo po počátečním propadu adheze k nárůstu a ustálení na hodnotě vyšší než 0,15. Snižováním množství maziva na 2 % nedošlo k ovlivnění délky ani velikosti propadu adheze. Jediný rozdíl nastal při nárůstu adhezní křivky do vyšších hodnot součinitele adheze. Použití maziva v mokrému filmu tedy vede k snížení součinitele adheze do velmi nízkých hodnot. Jediné složení, které by mohlo být vhodné pro modifikátor tření, bylo složení s maskem L a disulfidem molybdenu. Omezením je ovšem použití malých aplikovaných množství (5–10  $\mu\text{l}$ ), kde počáteční propad adheze je velmi krátký v porovnání s vyšší hodnotou adheze ve zbytku testu. Oxid zinku byl nevhodný z hlediska dosažení dostatečného součinitele adheze.

Testování suchého filmu znovu potvrdilo lepší mazací schopnost grafitu (viz obr. 6-2). Adhezní křivky všech testovaných kompozic vykazovaly lineární a konstantní průběhy. Oproti mokrému filmu se nevyskytovaly oblasti propadu součinitele adheze. Částice oxidu zinku, stejně jako v případě mokrého filmu, dosahovaly nižších hodnot součinitele adheze. Tyto výsledky naznačují horší schopnost oxidu zinku ovlivnit rozhraní mezi kontaktními tělesy v komplexnějších kompozicích. Opačného trendu bylo dosaženo v práci Wanga a kol. [39], kde menší a tvrdší částice hliníku dosahovaly vyšších hodnot součinitele adheze než větší a měkčí částice písku. Ve zmíněné práci ovšem bylo použito dvoudiskové zařízení



Obr. 6-2 Součinitel adheze na konci testu čtyřsložkových kompozic

a částice byly do kontaktu přidávány nepřetržitě po celou dobu testu. Tento fakt napovídá, že při aplikaci oxidu zinku dojde k vytlačení tvrdých částic mimo dráhu kuličky. Pouze nepřetržitou aplikací by mohlo dojít ke zvýšení efektivity těchto částic. Malá kontaktní oblast, kterou vytváří zařízení MTM, také může napomáhat jednoduššímu odstranění částic z kontaktu (částice mají kratší cestu ze středu na okraj kontaktu). Měkčí částice mastku jsou nadrceny a vměstnány do nerovností na dráze kuličky a díky tomu mohou ovlivnit přenos sil mezi kontaktními tělesy.

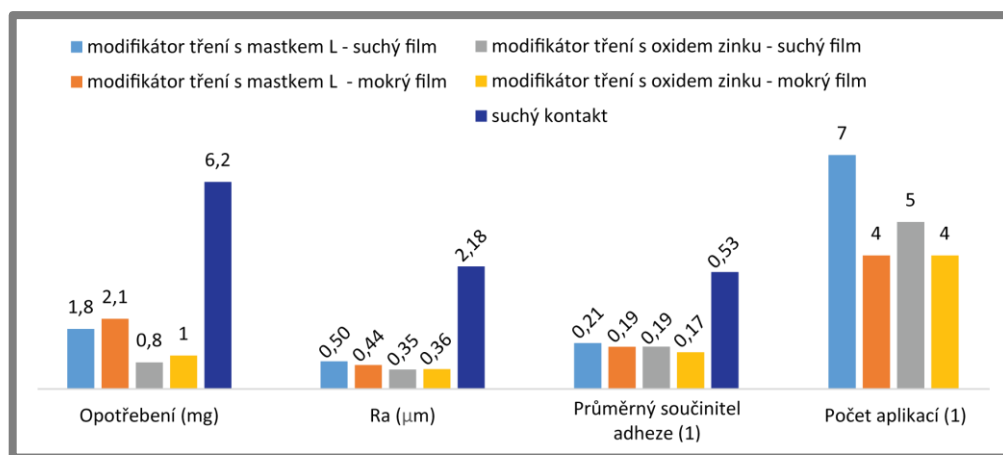
## 6.5 Testy opotřebení

Pro testy opotřebení byly na základě předchozích testů vybrány dvě kompozice se 7,5 % bentonitu, 5 % částic pro modifikaci tření (mastek L a oxid zinku) a 2 % disulfidu molybdenu. Obě kompozice byly testovány pro suchý a mokrý film, délka testu byla 60 minut a aplikované množství 20  $\mu\text{l}$ . Jako referenční byl zvolen test suchého kontaktu. Měření úbytku materiálu bylo provedeno zvážením disků před a po testu. Po ukončení všech testů byla provedena analýza povrchu pomocí optického profilometru. Suchý kontakt dosáhl součinitele adheze 0,6 a na povrchu disku byly výrazné plastické deformace, způsobené utrženými částicemi opotřebení. Během testu došlo k úběru 6,2 mg materiálu a drsnost dráhy ( $R_a$ ) stoupla z 0,6  $\mu\text{m}$  na 2,2  $\mu\text{m}$ .

Využitím modifikátoru tření s částicemi mastku L došlo k výraznému snížení opotřebení (66–71 %) a také snížení drsnosti (obr. 6-3). Aplikace modifikátoru tření zajistila průměrný součinitel adheze přibližně 0,2 jak pro suchý tak mokrý film. V případě použití suchého filmu byla potřeba sedm aplikací. Interval mezi aplikacemi byl vždy stejný (cca 10 minut) Naopak mokrý film byl aplikován pouze čtyřikrát. Čtvrtá aplikace mokrého filmu udržela součinitel adheze na hodnotách mezi 0,15–0,2 po dobu více jak 20 minut. Povrch disku po aplikaci suchého filmu nebyl výrazně poškozen zejména proto, že částice mastku vytvořily vrstvu na povrchu disku, která chránila povrch před poškozením. Tato vrstva byla odstraněna mechanicky až po ukončení testu. Tento fakt naznačuje, že prokluz mezi kontaktními povrchy nebyl dostatečně účinný při odstraňování vrstvy mastku. Aplikace mokrého filmu také dokázala povrch ochránit před výraznějším



poškozením, nicméně analýza povrchu ukázala větší plastické deformace než v případě suchého filmu.



Obr. 6-3 Vyhodnocení testů opotřebení

Druhá testovaná kompozice s oxidem zinku dosáhla výraznějšího snížení opotřebení (84–87 % oproti suchému kontaktu) než modifikátor tření s mastkem. Drsnost povrchu byla také nižší a průměrný součinitel adheze byl v průběhu testu 0,19 pro suchý film a 0,17 pro mokrý film. V průběhu testu se suchým filmem bylo provedeno 5 aplikací a s mokrým filmem 4 aplikace. Stejně jako s první testovanou kompozicí dosáhla poslední aplikace mokrého filmu doby trvání delší než 20 minut. Na povrchu disku byl pro oba filmy znatelný přilnutý film z částic oxidu zinku, který ochránil povrchy před výraznějším poškozením. Oba testy s oxidem zinku ovšem vytvořily důlky na povrchu disku způsobené tvrdými částicemi zinku. Velikost poškození byla místy větší než v případě modifikátoru tření s mastkem. V případě mokrého filmu se na některých místech objevily rýhy. Podobné poškození povrchu bylo pozorováno při aplikaci olejových modifikátorů tření s kovovými částicemi [43]. Tento typ poškození je způsoben větší tvrdostí částic, než je základní materiál.

Jelikož se ukázalo, že při očištění vzorků ultrazvukem nedojde k odstranění vtisknutého materiálu, mohou být výsledné hodnoty opotřebení zkreslené špatně odstranitelnými částicemi na povrchu disku. Dále je z obr. 6-3 patrné, že existuje korelace mezi množstvím opotřebení, drsností povrchu a průměrným součinitelem adheze. Je ovšem potřeba vzít v potaz, že v případě suchých filmů došlo k vyššímu počtu aplikací. Lze tedy předpokládat, že častější přechod na suchý kontakt zvýší průměrné hodnoty součinitele adheze.

## 6.6 Limitace experimentální studie

Pro ověření opakovatelnosti měření byly některé vybrané testy provedeny dvakrát. Z naměřených dat byly porovnány součinitele adheze vždy ve stejný časový moment. Průměrná odchylka součinitele adheze činila  $\pm 0,01$ . Vliv drsnosti byl zjištěn měřením kompozice s vodou a 15 % mastku L (50 µl). První test proběhl ihned po záběhu nového disku a druhý po ukončení všech experimentů. Porovnány byly pouze oblasti označené jako I a II (obr. 5-14, str. 47). Průměrná odchylka součinitele adheze činila  $\pm 0,03$ .

Při interpretaci výsledků je třeba brát ohled na zvolené metody a zařízení. Kontakt kuličky a disku na zařízení MTM neodpovídá velikostí a tvarem reálnému kontaktu kola a kolejnice. Při porovnání velikosti kontaktní oblasti s použitými částicemi je však patrné, že malá kontaktní oblast by neměla mít zásadní vliv na vstup částic do kontaktu. Použitý kontaktní tlak přibližně odpovídá kontaktním tlakům vyskytujícím se u tramvajových vozidel, avšak zcela jiné provozní podmínky nastávají u vlaků. Zvolená rychlost je částečně limitována použitým zařízením, avšak s ohledem na predikovaný režim mazání a zabránění odstředování aplikovaných látek je vyhovující. Skluz byl zvolen s ohledem na předchozí publikované práce tak, aby bylo zajištěno překročení bodu saturace trakční křivky, kdy se součinitel adheze již výrazně nemění. Materiály kontaktních těles pro testy adhezního chování neodpovídají materiálům běžně používaným pro kolo nebo kolejnici. Použití ložiskové oceli je ovšem výhodnější z hlediska zajištění stejných podmínek pro všechny experimenty. I kdyby byl použit materiál bližší kolu a kolejnici nebylo by zaručeno, že v laboratorních podmínkách bude třecí vrstva mezi kontaktními tělesy stejná jako v reálných podmínkách na trati. Drsnost povrchů v kontaktu odpovídala drsnostem vyskytujícím se v kontaktu kola a kolejnice.

Aplikace modifikátoru tření probíhala nanášením látky do kontaktu pomocí mikropipety nebo injekční stříkačky, tento způsob se blíží takzvaným off-board stacionárním jednotkám, které se umísťují ke kolejnicím. Druhý způsob aplikace je založen na nástřiku modifikátoru tření na kontaktní povrch. Oba způsoby mohou vést na jiné rozložení maziva na povrchu a tedy i jiné chování aplikované látky. Použité zařízení také nedovoluje simulovat podmínky projetí nanášenou vrstvou modifikátoru tření, jako v případě kolejového vozidla. Pro další práci je nezbytné se zabývat redistribucí maziva

Experimenty probíhaly za pokojové teploty a vlhkosti. Během testů nebyla pozorována výrazná změna teploty ani vlhkosti.

## 7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá popsáním vlivu hlavních složek vodního modifikátoru tření na adhezní chování, utváření filmu a opotřebení. Modifikátory tření představují nový efektivní způsob řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice. Pozitiva zasahují jak do oblasti zajištění vhodné adheze, tak i redukce hluku a opotřebení. Doposud publikované práce potvrzují zmíněné pozitivní dopady s komerčními modifikátory tření. Většina těchto publikací se ovšem nezabývá vlivem složení a parametrů jednotlivých složek (např. materiál, velikost částic a tvrdost částic), které jsou pro komerční modifikátory tření nedostupné.

Součástí diplomové práce je současný stav poznání, ve kterém jsou shrnuty základní poznatky o přenosu sil mezi kolem a kolejnici, režimech mazání a třecích vrstvách. Dále jsou na základě dostupných patentů vybrány testované materiály pro modifikátory tření a postup přípravy vzorků. Pro dosažení hlavních cílů diplomové práce bylo zvoleno zařízení Mini Traction Machine a byla detailně popsána experimentální metodika. Sledování kontaktu bylo provedeno na optickém tribometru a analýza povrchu na optickém profilometru. Testy probíhaly za stejných podmínek a aplikace přesného množství byla provedena mikropipetou. Samotné měření probíhalo od samostatných látek až po složené kompozice.

Získané výsledky ukazují výrazný vliv zahušťovadla na chování složených kompozic. Samotné zahušťovadlo s vodou dokáže zajistit optimální hodnoty součinitele adheze. Přidáním minerálních částic do mokré kompozice s vodou a zahušťovadlem ovšem dojde překvapivě k poklesu součinitele adheze do nepřijatelných hodnot. Opačného trendu je dosaženo s kovovými částicemi, kde součinitel adheze zpočátku dosahuje vyšších hodnot. Použití maziva v mokrému filmu způsobuje velmi nízké hodnoty adheze, proto by měl být kladen důraz na použití kompozic s mazivem výhradně jen po vyschnutí základní báze. Z testů opotřebení vyplynulo, že modifikátory tření dokáží výrazně snížit poškození a opotřebení kontaktních těles při udržení dostatečného součinitele adheze.

Stanovený cíl práce byl splněn v celém rozsahu. Výsledky práce lze použít nejen při návrhu modifikátoru tření, ale také lze některé závěry zohlednit při konstrukci aplikačních jednotek. Získané poznatky byly sepsány do odborného článku s názvem „*The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application*“.

Při řešení diplomové práce vyšly najevo otázky, které v rámci vymezené práce nebylo možné zodpovědět. Jako nejzajímavější se jeví detailnější studium utváření třecích vrstev mezi kontaktními tělesy. Z hlediska dalšího výzkumu je také zajímavou oblastí interakce modifikátoru tření a jeho složek s kontaminanty běžně přítomnými v kontaktu kola a kolejnice.



**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ****8**

- [1] OLOFSSON, U. a R. LEWIS. *Wheel-rail interface handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [2] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. 3. vyd. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1993. ISBN 0-444-89235-4.
- [3] SUH, N. P. a H.-C. SIN. The genesis of friction. *Wear* [online]. 1981, roč. 69, č. 1, s. 91–114. Dostupné z: doi:0043-1648(81)90315-X
- [4] ZHU, Y. Adhesion in the wheel-rail contact. Stockholm, 2013. Disertační práce. Royal Institute of Technology. Department of Machine Design. Vedoucí práce Prof. Ulf Olofsson. 2013. ISBN 978-91-7501-896-6
- [5] BHUSHAN, B. *Introduction to Tribology, Second Edition* [online]. 2. vyd. Columbus: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9781119944539. Dostupné z: doi:10.1002/9781118403259
- [6] GRASSIE, S. L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments. In: *IMEchE vol. 223 Part F: J. Rail and Rapid Transit* [online]. 2009, s. 1–17. ISBN 0954-4097. Dostupné z: doi:10.1243/09544097JRRT264
- [7] BEAGLEY, T. M., I. J. MCEWEN a C. PRITCHARD. Wheel rail adhesion - boundary lubrication by oily fluids. *Wear*. 1975, roč. 31, č. 1, s. 77–88.
- [8] BEAGLEY, T. M. The rheological properties of solid rail contaminants and their effect on wheel/rail adhesion. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 1976, s. 419–428. ISSN 0954-4119. Dostupné z: doi:10.1243/PIME
- [9] HOU, K., J. KALOUSEK a E. MAGEL. Rheological model of solid layer in rolling contact. *Wear* [online]. 1997, roč. 211, č. 1, s. 134–140. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(97)00097-5
- [10] ZHU, Y. Adhesion in the wheel-rail contact under contaminated conditions. Stockholm, 2011. Diplomová práce. Royal Institute of Technology. Department of Machine Design. Vedoucí práce Prof. Ulf Olofsson. 2011. ISBN 978-91-7501-896-6.
- [11] LU, X., J. COTTER a D. T. EADIE. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. *Wear* [online]. 2005, roč. 259, č. 7–12, s. 1262–1269. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2005.01.018
- [12] AXÉN, N., I. M. HUTCHINGS a S. JACOBSON. A model for the friction of multiphase materials in abrasion. *Tribology International* [online]. 1996, roč. 29, č. 6, s. 467–475. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/0301-679X(95)00104-C
- [13] LI, Z. a O. ARIAS-CUEVAS. An investigation on the desired properties of friction modifiers for slippery rails. In: *International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems*. 2009, s. 16–19.
- [14] LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNANDEZ. Rolling–Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel–Rail Contacts. *Tribology Letters* [online]. 2009, roč. 33, č. 2, s. 97–109. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-008-9393-3

- [15] AREIZA, Y. A., S. I. GARCÉS, J. F. SANTA, G. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International* [online]. 2014, roč. 82, č. PB, s. 274–279. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2014.08.009
- [16] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNANDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear* [online]. 2010, roč. 268, č. 2–3, s. 543–551. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2009.09.015
- [17] TOMEOKA, M., N. KABE, M. TANIMOTO, E. MIYAUCHI a M. NAKATA. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication. *Wear* [online]. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 124–129. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(02)00091-1
- [18] MATSUMOTO, K., Y. SUDA, T. IWASA, T. FUJII, M. TOMEOKA, M. TANIMOTO, Y. KISHIMOTO a T. NAKAI. A Method to Apply Friction Modifier in Railway System. In: *JSME International Journal Series C* [online]. 2004, s. 482–487. ISSN 1344-7653. Dostupné z: doi:10.1299/jsmec.47.482
- [19] SUDA, Y., T. IWASA, H. KOMINE, M. TOMEOKA, H. NAKAZAWA, K. MATSUMOTO, T. NAKAI, M. TANIMOTO a Y. KISHIMOTO. Development of onboard friction control. *Wear* [online]. 2005, roč. 258, č. 7–8, s. 1109–1114. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.03.059
- [20] SATO, Y., A. MATSUMOTO a K. KNOTHE. Review on rail corrugation studies. *Wear* [online]. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 130–139. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(02)00092-3
- [21] SEO, J.-W., H.-K. JUN, S.-J. KWON a D.-H. LEE. Effect of Friction Modifier on Rolling Contact Fatigue and Wear of Wheel and Rail Materials. *Tribology Transactions* [online]. 2016, roč. 0, č. 0, s. 1–12. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2016.1271487
- [22] EADIE, D. T., D. ELVIDGE, K. D. OLDKNOW, R. STOCK, P. POINTNER, J. KALOUSEK a P. KLAUSER. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear* [online]. 2008, roč. 265, č. 9–10, s. 1222–1230. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2008.02.029
- [23] STOCK, R., D. T. EADIE, D. ELVIDGE a K. D. OLDKNOW. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application - A full scale wheel-rail test rig study. *Wear* [online]. 2011, roč. 271, č. 1–2, s. 134–142. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.10.006
- [24] LIU, X. a P. A. MEEHAN. Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2016, roč. 371, s. 393–405. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2016.02.028
- [25] EADIE, D. T., J. KALOUSEK a K. CHIDDICK. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear* [online]. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 185–192. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(02)00098-4
- [26] EADIE, D. T., M. SANTORO a W. POWELL. Local control of noise and vibration with KELTRACK friction modifier and Protector trackside

- application: An integrated solution. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2003, roč. 267, č. 3, s. 761–772. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-460X(03)00739-9
- [27] EADIE, D. T., M. SANTORO a J. KALOUSEK. Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: Changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear* [online]. 2005, roč. 258, č. 7–8, s. 1148–1155. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.03.061
- [28] COTTER, J. Friction control compositions with enhanced retentivity. US. United States Patent US 6,759,372 B2. 2004.
- [29] EADIE, D. T., X. LU a J. COTTER. Modified friction control compositions. US. United States Patent US 7,939,476 B2. 2011.
- [30] CHIDDICK, K. Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail application. US. United States Patent 6,136,757. 2000.
- [31] CHIDDICK, K. Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail application. DE. European patent specification EP 0 946 693 B1. 2005.
- [32] CHIDDICK, K., A. MEDRANO, R. KRINKER, K. WILSON a D. BIRDWELL. Positive friction control composition for railways. US. International application published under the patent cooperation treaty (PCT) WO 2016/107581 A1. 2014.
- [33] ISHIDA, M. The history and current status of theory and practice on rail/wheel contact. In: *Jpn. Soc. Trib.* 45. 2000, s. 503–508.
- [34] INSTRUMENTS, PCS. *MTM (Mini Traction Machine) / PCS Instruments* [online]. 2017 [cit. 12. květen 2017]. Dostupné z: <http://pcs-instruments.com/product/mtm-mini-traction-machine/>
- [35] ŠPERKA, P. 3D optický profilometr pro mapování inženýrských povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 83 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [36] BRUKER. *Bruker: ContourGT-X - Overview* [online]. 2017 [cit. 25. říjen 2016]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/3d-optical-microscopes/contourgt-x/overview.html>
- [37] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces* [online]. 2016, roč. 5831, č. October, s. 1–13. ISSN 1751-5831. Dostupné z: doi:10.1080/17515831.2016.1216265
- [38] ZHU, Y., U. OLOFSSON a K. PERSSON. Investigation of factors influencing wheel-rail adhesion using a mini-traction machine. *Wear* [online]. 2012, roč. 292–293, s. 218–231. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2012.05.006
- [39] WANG, W. J., T. F. LIU, H. Y. WANG, Q. Y. LIU, M. H. ZHU a X. S. JIN. Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions. *Tribology International* [online]. 2014, roč. 75, s. 16–23. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2014.03.008
- [40] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI a R. LEWIS. A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel-rail contact. *Wear* [online]. 2011, roč. 271, č. 1–2, s. 14–24. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.10.050
- [41] CAO, X., W. L. HUANG, C. G. HE, J. F. PENG, J. GUO, W. J. WANG, Q.

- Y. LIU a M. H. ZHU. The effect of alumina particle on improving adhesion and wear damage of wheel/rail under wet conditions. *Wear* [online]. 2016, roč. 348–349, s. 98–115. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.12.004
- [42] STOCK, R., L. STANLAKE, C. HARDWICK, D. EADIE a R. LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – classification , characterization and application. *Proceedings of 10th international conference on contact mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems* [online]. 2015, s. 1–8. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2016.05.028
- [43] GALAS, R., M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear* [online]. 2016, roč. 368–369, s. 230–238. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2016.09.015
- [44] BEAGLEY, T. M. a C. PRITCHARD. Wheel/rail adhesion - the overriding influence of water. *Wear* [online]. 1975, roč. 35, č. 2, s. 299–313. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(75)90078-2

**9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN****9**

---

**9.1 Seznam použitých zkratk**

CCD	- charge-coupled device
EHD	- elastohydrodynamické
FMA	- friction modifier A
FMB	- friction modifier B
HD	- hydrodynamické
HPF	- high coefficient of friction
LCF	- low coefficient of friction
MTM	- Mini traction machine
OFG	- oil friction modifier
PSI	- phase shifting interferometry
SRR	- slide-to-roll ratio
ToR FM	- top of rail friction modifier
VHPF	- very high coefficient of friction
VSI	- vertical scanning interferometry
WFM	- water friction modifier

**9.2 Seznam použitých symbolů**

$F$	[N]	- tažná síla
$F_f$	[N]	- třecí síla
$F_N$	[N]	- normálová síla
$F_T$	[N]	- trakční síla
$m$	[kg]	- hmotnost
$r$	[m]	- poloměr kola
$T$	[N·m]	- moment
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	- rychlost
$\omega$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	- úhlová rychlost
$\xi$	[1]	- skluz

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 2-1</b> Názvosloví kola (modrá) a kolejnice (šedá) .....	14
<b>Obr. 2-2</b> Schéma a) smýkání tělesa po podložce, b) valení válce po podložce [4] ..	15
<b>Obr. 2-3</b> Trakční křivka - upraveno [4] .....	16
<b>Obr. 2-4</b> Trakční křivka pro kontakt kola a kolejnice - upraveno [4] .....	17
<b>Obr. 2-5</b> Režimy mazání - upraveno [5] .....	17
<b>Obr. 2-6</b> Vliv množství pevných částic ve vodě na smykovou pevnost – upraveno [8] .....	18
<b>Obr. 2-7</b> Smykové napětí látek za různého skluzu – upraveno [9] .....	19
<b>Obr. 2-8</b> Dvě kontaktní oblasti kola a kolejnice [1] .....	20
<b>Obr. 2-9</b> a) trakční křivky směsi modifikátoru a $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , b) modifikátor kontaminovaný mazivem [11] .....	21
<b>Obr. 2-10</b> Porovnání modifikátorů tření při aplikaci jedné kapky vody [13] .....	22
<b>Obr. 2-11</b> Porovnání modifikátorů tření při kontaminaci listím [14] .....	22
<b>Obr. 2-12</b> Porovnání součinitelů tření u různých zařízení [15] .....	23
<b>Obr. 2-13</b> Součinitel adheze naměřený ručním tribometrem [15] .....	24
<b>Obr. 2-14</b> Trakční křivky testovaných modifikátorů tření [16] .....	24
<b>Obr. 2-15</b> Trakční křivky testovaných modifikátorů tření [17] .....	25
<b>Obr. 2-16</b> Vliv a) skluzu na vrstvu modifikátoru tření, b) aplikovaného množství – upraveno [18] .....	26
<b>Obr. 2-17</b> a) trakční křivky, b) opětovná aplikace modifikátoru tření – upraveno [19] .....	26
<b>Obr. 2-18</b> Grafy testovaných podmínek a) součinitel adheze, b) opotřebení – upraveno [21] .....	27
<b>Obr. 2-19</b> Rozvoj trhliny a) vznik, b) růst, c) uzavření kapaliny, d) další růst – upraveno [21] .....	28
<b>Obr. 2-20</b> Porovnání opotřebení a počtu trhlin [22] .....	28
<b>Obr. 2-21</b> Vliv úhlu náběhu na a) poměr laterální a vertikální síly, b) hluku – upraveno [24][24][19] .....	29
<b>Obr. 2-22</b> Změna hluku při použití modifikátoru tření [26] .....	30
<b>Obr. 2-23</b> Složení modifikátoru tření .....	31
<b>Obr. 4-1</b> a) bentonit, b) oxid zinku, c) mastek L, d) mastek M, e) mastek S, f) grafit, g) molyka .....	34
<b>Obr. 4-2</b> Mini Traction Machine [34] .....	35
<b>Obr. 4-3</b> Bruker Contour GT-X [36] .....	36
<b>Obr. 4-4</b> Optický tribometr .....	37
<b>Obr. 4-5</b> Adhezní křivky samostatných komponent .....	38
<b>Obr. 4-6</b> Postup měření .....	39
<b>Obr. 5-1</b> Adhezní křivky samostatných komponent .....	40
<b>Obr. 5-2</b> Vytvořené vrstvy po ukončení experimentu: a) mastek HTP, b) bentonit, c) disulfid molybdenu, d) grafit .....	40
<b>Obr. 5-3</b> Adhezní křivky vody (mokrý film) .....	41
<b>Obr. 5-4</b> Adhezní křivky kompozice vody a bentonitu (1 ml, mokrý film) .....	42
<b>Obr. 5-5</b> Detaily a) kuličky po testu s 15 % bentonitu, b) disku po testu s 5 % bentonitu, c) disku po testu s 15 % bentonitu (1 ml, mokrý film) .....	42
<b>Obr. 5-6</b> Adhezní křivky kompozice vody a mastku L (1 ml, mokrý film) .....	43



<b>Obr. 5-7</b> Průběh měření s 2 % mastku L (vlevo) a 10% mastku L (vpravo) (mokrý film) .....	43
<b>Obr. 5-8</b> Snímky z kolorimetrické interferometrie: a) statický kontakt s vodou, b) 10 % bentonitu, c) 15 % bentonitu (mokrý film) .....	44
<b>Obr. 5-9</b> Zobrazení vrstvy vytvořené kompozicí vody a 15 % mastku (mokrý film) .....	44
<b>Obr. 5-10</b> Adhezní křivky kompozice vody a 5 % bentonitu (mokrý film) .....	45
<b>Obr. 5-11</b> Adhezní křivky kompozice vody a 10 % bentonitu (mokrý film) .....	45
<b>Obr. 5-12</b> Adhezní křivky kompozice vody a 15 % bentonitu (mokrý film) .....	46
<b>Obr. 5-13</b> Adhezní křivky kompozice vody a 5 % mastku L (mokrý film) .....	46
<b>Obr. 5-14</b> Adhezní křivky kompozice vody a mastku L (50 $\mu$ l, mokrý film) .....	47
<b>Obr. 5-15</b> Adhezní křivky kompozice vody a 5 % oxidu zinku (mokrý film) .....	47
<b>Obr. 5-16</b> Adhezní křivky kompozice vody a částic pro modifikaci tření (50 $\mu$ l, mokrý film) .....	48
<b>Obr. 5-17</b> Adhezní křivky kompozice vody, 5 % bentonitu a mastku L (50 $\mu$ l, mokrý film) .....	49
<b>Obr. 5-18</b> Adhezní křivky kompozice vody, 10 % bentonitu a mastku L (50 $\mu$ l, mokrý film) .....	49
<b>Obr. 5-19</b> Adhezní křivky kompozice vody, 5 % bentonitu a 5 % oxidu zinku (mokrý film) .....	50
<b>Obr. 5-20</b> Adhezní křivky kompozice vody, bentonitu a oxidu zinku (50 $\mu$ l, mokrý film) .....	50
<b>Obr. 5-21</b> Adhezní křivky kompozice vody, mastku L a disulfidu molybdenu (20 $\mu$ l, mokrý film) .....	51
<b>Obr. 5-22</b> Adhezní křivky kompozice vody, 5 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	51
<b>Obr. 5-23</b> Adhezní křivky kompozice vody, 15 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	52
<b>Obr. 5-24</b> Adhezní křivky kompozice vody, 5 % mastku L a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film) .....	52
<b>Obr. 5-25</b> Adhezní křivky kompozice vody, 5 % mastku L a 1 % grafitu (suchý film) .....	53
<b>Obr. 5-26</b> Nanesené vrstvy 50 $\mu$ l 5 % mastku L a a) 1 % disulfid molybdenu, b) 1 % grafit .....	53
<b>Obr. 5-27</b> Adhezní křivky kompozice vody, 15 % mastku L a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film) .....	54
<b>Obr. 5-28</b> Adhezní křivky kompozice vody, 15 % mastku S a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film) .....	54
<b>Obr. 5-29</b> Adhezní křivky kompozice vody, 15 % oxidu zinku a 1 % disulfidu molybdenu (suchý film) .....	55
<b>Obr. 5-30</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	55
<b>Obr. 5-31</b> Snímky kontaktu zaplaveného vodou a a) 5 % disulfidu molybdenu, b) a c) 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu .....	56
<b>Obr. 5-32</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % grafitu (mokrý film) .....	56
<b>Obr. 5-33</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 5 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	57



<b>Obr. 5-34</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 5 % grafitu (mokrý film) .....	57
<b>Obr. 5-35</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	58
<b>Obr. 5-36</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % disulfidu molybdenu (suchý film).....	58
<b>Obr. 5-37</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 5 % grafitu (suchý film) .....	59
<b>Obr. 5-38</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxid zinku a 5 % disulfidu molybdenu (suchý film).....	59
<b>Obr. 5-39</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxid zinku a 5 % grafitu (suchý film) .....	60
<b>Obr. 5-40</b> Adhezní křivky kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxid zinku a 2 % disulfidu molybdenu (suchý film).....	60
<b>Obr. 5-41</b> Adhezní křivka suchého kontaktu .....	61
<b>Obr. 5-42</b> Analýza povrchu disku po testu suchého kontaktu .....	61
<b>Obr. 5-43</b> Adhezní křivka kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu .....	62
<b>Obr. 5-44</b> Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu (suchý film) .....	62
<b>Obr. 5-45</b> Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % mastku L a 2 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	62
<b>Obr. 5-46</b> Adhezní křivka kompozice vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 2 % disulfidu molybdenu .....	63
<b>Obr. 5-47</b> Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 2 % disulfidu molybdenu (suchý film) .....	63
<b>Obr. 5-48</b> Analýza povrchu disku po testu s kompozicí vody, 7,5 % bentonitu, 5 % oxidu zinku a 2 % disulfidu molybdenu (mokrý film) .....	64
<b>Obr. 6-1</b> Efektivní doby působení vody s bentonitem .....	66
<b>Obr. 6-2</b> Součinitel adheze na konci testu čtyřsložkových kompozic .....	69
<b>Obr. 6-3</b> Vyhodnocení testů opotřebení .....	70

## **11 SEZNAM TABULEK**

**11**

---

Tab. 4-1 Parametry testovaných látek .....	34
Tab. 4-2 Parametry MTM.....	35
Tab. 4-3 Parametry experimentů .....	36
Tab. 5-1 Viskozita vody a bentonitu .....	41

---

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Tabulka testovaných kompozic  
**Příloha 2** GALAS, R., D. KVARDA, M. OMASTA, I. KŘUPKA a M. HARTL. *The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application.*

**PŘÍLOHA 1**

Tabulka testovaných kompozic

Č. kompozice	Zákl. médium	Zahušťovadlo	Částice	Mazivo
1	voda	5 % bentonit		
2	voda	10 % bentonit		
3	voda	12,5 % bentonit		
4	voda	15 % bentonit		
5	voda		2 % mastek L	
6	voda		5 % mastek L	
7	voda		8,5 % mastek L	
8	voda		10 % mastek L	
9	voda		15 % mastek L	
10	voda		25 % mastek L	
11	voda		50 % mastek L	
12	voda		5 % oxid zinku	
13	voda	5 % bentonit	5 % mastek L	
14	voda	5 % bentonit	10 % mastek L	
15	voda	5 % bentonit	15 % mastek L	
16	voda	10 % bentonit	5 % mastek L	
17	voda	10 % bentonit	10 % mastek L	
18	voda	10 % bentonit	15 % mastek L	
19	voda	15 % bentonit	5 % mastek L	
20	voda	15 % bentonit	10 % mastek L	
21	voda	15 % bentonit	15 % mastek L	
22	voda	5 % bentonit	5 % oxid zinku	
23	voda	5 % bentonit	15 % oxid zinku	
24	voda	10 % bentonit	5 % oxid zinku	
25	voda	10 % bentonit	15 % oxid zinku	
26	voda		5 % mastek L	1 % disulfid molybdenu
27	voda		15 % mastek L	1 % disulfid molybdenu
28	voda		15 % mastek S	1 % disulfid molybdenu
29	voda		5 % oxid zinku	1 % disulfid molybdenu
30	voda		15 % oxid zinku	1 % disulfid molybdenu
31	voda		5 % mastek L	1 % grafit
32	voda	7,5 % bentonit	5 % mastek L	5 % disulfid molybdenu
33	voda	7,5 % bentonit	5 % mastek L	5 % grafit
34	voda	7,5 % bentonit	5 % oxid zinku	5 % disulfid molybdenu
35	voda	7,5 % bentonit	5 % oxid zinku	5 % grafit
36	voda	7,5 % bentonit	5 % mastek L	2 % disulfid molybdenu
37	voda	7,5 % bentonit	5 % oxid zinku	2 % disulfid molybdenu